



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Bigues saltadores amb pretensat extradossat: Un nou sistema de reforç provisional de ponts

Treball realitzat per:

Oriol Guillamon Villalba

Dirigit per:

Antonio Aguado de Cea

Grau en:

Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, octubre de 2019

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

INDEX

	Pàgina
AGRAÏMENTS.....	1
RESUM.....	3
CAPÍTOL 1.- INTRODUCCIÓ.....	5
1.1.- Introducció.....	5
1.2.- Objectiu.....	6
1.3.- Mètode.....	7
CAPÍTOL 2.- ESTAT ACTUAL DEL REFORÇ PROVISIONAL DE PONTS.....	13
2.1.- Introducció.....	13
2.2.- Necessitat de reforçar ponts de manera provisional.....	13
2.2.1.- Capacitat portant dels ponts.....	14
2.2.2.- Anàlisi de quan cal reforçar els ponts.....	17
2.3.- Reforç provisional de ponts.....	26
2.3.1.- Apuntaments.....	27
2.3.2.- Bigues saltadores.....	32
2.3.3.- Avantatges i limitacions dels sistemes actual.....	34
2.4.- Sistemes interessants provinents del reforç permanent de ponts.....	35
2.4.1.- Pretensat exterior.....	36
2.4.2.- Altes sistemes de reforç permanent.....	40
CAPÍTOL 3.- NOU SISTEMA DE REFORÇ PROVISIONAL DE PONTS.....	45
3.1.- Introducció.....	45
3.2.- Bigues saltadores recolzades al mig del pont.....	45
3.2.1.- Combinació amb cindri al mig del pont.....	48
3.2.2.- Combinació amb pretensat exterior al mig del pont.....	50
3.3.- Pretensat variable.....	50

CAPÍTOL 4.- BIGUES SALTADORES AMB PRETENSAT EXTRADOSSA.....	55
4.1.- Introducció.....	55
4.2.- Consideracions estructurals del sistema proposat.....	56
4.3.- Predimensionament del pretensat.....	62
4.4.- Evolució del sistema proposa.....	69
CAPÍTOL 5.- CONCLUSIONS.....	71
5.1.- Conclusions	71
5.2.- Recomanacions.....	72
CAPÍTOL 6.- BIBLIOGRAFIA.....	77
ANNEXOS.....	79

Annex 1.- Relació entre el pas del vehicle pesant i la força de pretensat variable

AGRAÏMENTS

Primerament vull exposar el meu agraïment a tots els professors que he tingut durant els meus estudis universitaris, i en especial a Antonio Aguado de Cea, el tutor del present treball i una persona amb una gran experiència acadèmica i professional, a part d'una gran vocació com a tutor i com a mestre, cosa que he pogut agrair durant la confecció d'aquest treball.

Tots ells m'han inspirat d'una manera o altra en el fet de voler conèixer i saber interpretar la realitat per, posteriorment, poder aportar el meu propi granet de sorra per contribuir a una societat més ben construïda.

També vull fer extensiu el meu agraïment als amics, tant els de l'UPC com els d'altres àmbits, que m'han animat a abocar-me amb plena dedicació en aquest treball, acceptant amb total comprensió que dediqués, durant uns mesos, més temps a aquest treball acadèmic que a alimentar la nostra amistat.

Finalment vull agrair a tota la meva família, i en particular a la Marta, el suport incondicional i la inspiració per seguir construint. Amb vosaltres també construeixo, sobretot un camí interior.

RESUM

Les *bigues saltadores amb pretensat extradossat* són un sistema innovador de reforç provisional de ponts que dona resposta a una necessitat real per poder ampliar considerablement el camp d'aplicació dels reforços actuals.

Aquest nou sistema s'inspira en sistemes i mètodes ja existents, com les *bigues saltadores* i el *pretensat exterior*, però utilitzant-los d'una manera totalment nova. En aquest nou sistema plantejat també s'utilitza la filosofia del *pretensat extradossat*. La idea fonamental de l'autor del present treball és clara: no cal inventar de nou la roda, sinó que cal intentar millorar-la, i en aquest cas, d'una manera molt innovadora.

Aquest treball presenta les bases teòriques d'aquest nou sistema, fa unes consideracions estructurals bàsiques que demostren l'aplicabilitat de la proposta realitzada i dona pautes per a la seva possible implantació al mercat.

També exposa els aspectes estructurals i de dimensionament que cal seguir estudiant amb més detall fins a poder fer una proposta del sistema plantejat a nivell industrial, si aquest en fos l'objectiu final.

L'objectiu d'aquest treball té moltes dimensions, entre les quals destaquen la necessitat acadèmica implícita que imposa l'estudi de Grau en Enginyeria d'Obres Públiques, i també la voluntat que els ponts no siguin mai barreres per al progrés, sinó que puguin fer sempre les seves funcions, que són escurçar distàncies i unir. Amb aquest desig et convido a endinsar-te en aquest treball.

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

1.1.- INTRODUCCIÓ

En l'actualitat, el sistema comercial que regeix en el món comporta l'existència de centres de producció allunyats dels centres de consum. Això implica la necessitat de transports de tot tipus, tant de persones com de productes, que es fan pels diferents mitjans existents.

Entre aquests transports es troben els de grans equips que, en alguna fase, requereixen un transport per carretera, on hi ha unes infraestructures, com per exemple els ponts, que potser no estan pensades per a aquest tipus de circumstàncies.

La necessitat de dur a terme transports extraordinàriament pesants (de l'ordre de centenars de tones) ve principalment de la demanda d'indústries químiques, nuclears, petrolieres o elèctriques que necessiten equipaments molt pesants, com per exemple grans turbines, generadors o transformadors.

Tot això pot representar un impediment o un condicionant insalvable, ja sigui per motius de seguretat estructural del pont, o per motius de temps o econòmics. Aquests equipaments representen unes càrregues excepcionals per a les quals molts ponts, tot i complir la normativa corresponent, no estan dissenyats.

Per això, davant la necessitat d'un transport d'aquestes característiques, es poden analitzar alternatives, per tal de triar-ne la que representi un cost i un temps d'execució menor, intentant evitar el pas per ponts. Aquestes alternatives poden ser:

- Transport de l'equipament pesant en peces de menor pes per a un posterior muntatge *in situ*. Així es fa, per exemple, amb grues mòbils de pes extremadament gran.
- Tria de traçats alternatius per carreteres existents sense pas per ponts, encara que suposin distàncies i temps de transport considerablement més llargs.
- Tria de combois de transport més llargs per tal de poder repartir la càrrega sobre una major longitud de calçada, de manera que aquesta càrrega sigui tolerada pel pont. En aquest cas hi ha condicionaments, com la disponibilitat d'aquests equipaments, i també assegurar que el comboi, a causa de les seves dimensions, pugui accedir al pont.
- Construcció de trams nous de carreteres provisionals o fer millores en trams existents per tal de poder realitzar el transport planejat evitant el pas per ponts. Aquesta opció és sovint l'escollida quan tant el pes com les dimensions de la càrrega són molt grans.
- Reforç permanent d'un pont, si la freqüència de transports especials que s'hi preveu ho justifica, com podria ser un pont proper a un nou centre de transport com un nou port, o un pont proper a una nova indústria de fabricació d'equipaments molt pesants.
- El reforç provisional de ponts pot ser una necessitat relativament freqüent en països on la xarxa viària és poc completa i, al mateix temps, les grans infraestructures i equipaments industrials no estan encara del tot establerts.

En països com el nostre, davant la necessitat de dur a terme transports especialment pesants s'opta, habitualment, per triar traçats sense el pas per ponts, tot i que, en conseqüència, els trajectes puguin ser molt més llargs i puguin requerir temps d'execució i costos més elevats.

Per les característiques acadèmiques d'aquest treball, amb temps i recursos limitats, no es fa un estudi detallat de mercat, sinó que es fa èmfasi en els aspectes conceptuals i estructurals del nou sistema proposat per reforçar ponts de manera provisional.

1.2.- OBJECTIU

El present estudi té com a objectiu principal desenvolupar, a nivell teòric, un nou sistema de reforç provisional de ponts que ampliaria considerablement les possibilitats actuals que hi ha per fer-ho.

L'estudi conclou amb una proposta innovadora aplicable a totes les tipologies de ponts, independentment de l'altura lliure sota el pont, per llums de fins a uns 50m i també en traçats de pont en corba, sense afectar l'estructura del pont. Aquest nou sistema de reforç provisional de ponts pot oferir a la indústria de transports especials

una solució molt polivalent, ràpida, econòmicament interessant i amb una tecnologia relativament senzilla a l'abast de moltes empreses.

Com a objectius secundaris, que podrien entendre's com l'ampliació o la continuació del present treball, es plantegen idees per poder dimensionar i dissenyar en detall les diferents parts que constitueixen el nou sistema de reforç proposat.

1.3.- MÈTODE

La innovació d'aquest treball es manifesta en el fet d'utilitzar equipaments i tècniques ja existents d'una manera totalment nova, ampliant-ne considerablement el camp d'aplicació, i en concret, pel reforç provisional de ponts.

Al llarg dels 6 capítols del treball s'exposen totes les idees i arguments que han servit per desenvolupar la proposta final d'un nou sistema de reforç provisional de ponts.

En el capítol 2 es fa un estudi estructural, relativament breu, sobre la necessitat de reforçar els ponts, comparant les càrregues de disseny amb les que poden representar els combois de transports especialment pesants. En el mateix capítol, s'hi fa un repàs de les tècniques i sistemes utilitzats en l'actualitat per al reforç provisional de ponts i se'n mostra el camp d'aplicació i els seus avantatges, però també s'hi posen en evidència les seves clares limitacions. Finalment es fa un repàs de la tècnica de pretensat exterior, que ha sigut una gran font d'inspiració per a l'autor al llarg de la confecció del treball.

En el capítol 3 es presenten unes de les idees més innovadores del treball, que són: la utilització de bigues saltadores d'una manera totalment nova recolzant-les al mig de la llum del pont, i la idea d'utilitzar un pretensat variable.

En el capítol 4, el més detallat i extens del treball, es desenvolupa un nou sistema estructural de reforç provisional de ponts, combinant l'ús de bigues saltadores, del pretensat exterior, i també la filosofia del pretensat extradossat, i conclou en una proposta innovadora de bigues saltadores amb pretensat extradossat. Aquests termes, que es tracten en detall en aquest capítol, s'introdueixen també al final d'aquest apartat per tal de situar el lector en el context correcte. El capítol acaba anomenant aspectes que caldria seguir estudiant per fer possible un desenvolupament industrial de la solució proposada, si aquest en fos un objectiu.

En el capítol 5 s'exposen les conclusions de l'estudi realitzat, resumint els passos seguits fins a la concepció estructural de les bigues saltadores amb pretensat extradossat. També es proposa una guia de presa de decisions per poder triar el sistema de reforç més adequat depenent de les característiques de cada transport i dels ponts a travessar. Finalment es proposa un esquema que podria servir de guia per a la implantació pràctica del nou sistema de reforç proposat, la qual cosa es fa amb un exemple concret.

En el capítol 6 s'inclou la bibliografia de referència consultada per a la realització del present treball. Cal dir que tots els enllaços web indicats porten a llocs web actius en el moment de redacció del treball (octubre del 2019), però cal tenir en compte que aquests llocs web poden tenir variacions, o fins i tot desaparèixer en un futur, de manera que els enllaços indicats podrien no portar al lloc desitjat.

Posteriorment es presenta l'apartat d'annexos, que són parts del treball on s'aprofundeix en algun càlcul específic o en l'obtenció de gràfiques, entre d'altres la que relaciona els metres que avança el comboi sobre el pont amb la força de pretensat que caldria aplicar al sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat.

Per finalitzar, convé introduir en aquest inici alguns termes importants de la nomenclatura tècnica utilitzada, com són: les *bigues saltadores*, el *pretensat exterior*, el *pretensat extradossat* i les *bigues saltadores amb pretensat extradossat*, presentats breument a continuació i tractats més a fons al llarg del treball.

Bigues saltadores

Estructura portàtil consistent en bigues metàl·liques que es col·loquen sobre ponts de llum relativament petita, de fins a uns 25m de llum. S'utilitzen principalment per al pas de càrregues molt elevades sobre ponts sense que aquests rebin pràcticament cap càrrega, ja que les bigues són més llargues que la llum del pont a travessar.

En la figura 1.1 es mostra l'exemple d'utilització de bigues saltadores en combinació amb un "vehicle plataforma", que és una solució integral que ofereixen moltes empreses especialitzades en transports especials.



Figura 1.1.- Bigues saltadores per "saltar" un pont (Font: http://edwardsmoving.com/wp-content/uploads/2013/12/Modular_Bridge_Jumper_Transformer-1030x687.jpg)

En aquest treball es proposa una manera totalment innovadora d'utilitzar les bigues saltadores, que és col·locant-les de manera que es recolzin just al mig del pont.

De manera simplificada, es pot dir que el que aconseguim utilitzant les bigues saltadores d'aquesta manera poc convencional, és convertir la càrrega exercida pel comboi de transport en una càrrega puntual i de magnitud total menor al pes total del

comboi. Els avantatges d'això es posen ampliament de manifest en el capítol 3 d'aquest treball.

Pretensat exterior

És un sistema que es basa en la utilització de tendons metàl·lics de gran resistència col·locats fora de la secció de les bigues o de les lloses resistents, és a dir, no recoberts de formigó o d'altres materials, que es tensen un cop l'estructura està conformada.

També hi ha tendons de pretensat exterior que es col·loquen a l'interior de seccions tipus caixó, però en aquest cas els tendons tampoc estan recoberts de formigó.

El pretensat exterior s'utilitza actualment com a solució de projecte o bé com a sistema de reforç permanent, tant en ponts com en altres estructures, com jàsseres o forjats.

Amb el pretensat exterior aconseguim introduir forces verticals ascendents a l'estructura, normalment concentrades en 1 o 2 punts a nivell, tot i que variant-ne l'excentricitat podem crear encara més punts d'aplicació d'aquestes forces verticals.

En la figura 1.2 es mostra un exemple d'un pont amb pretensat exterior de projecte amb un punt d'aplicació de la força vertical introduïda pel pretensat a. Es tracta del viaducte d'Osormort, situat en un tram de la C-25 (Eix Transversal de Catalunya).



Figura 1.2.- Exemple de pretensat exterior. (Font: <https://www.google.com/maps/@41.8956499,2.37453,3a,75y,178.48h,88.71t,1.4r/data=!3m6!1e1!3m4!1sdqHRp4yklkjl1Q3CijFqQ!2e0!7i16384!8i8192>)

Una altra innovació proposada en aquest treball és la que proposa utilitzar un pretensat exterior amb força variable.

Aquesta força variable, com es veurà durant el desenvolupament d'aquest treball, estarà coordinada amb la força, també variable, que exerceix el comboi de transport circulant per sobre les bigues saltadores, recolzades al mig del pont.

Aquesta idea està àmpliament explicada en el capítol 3 d'aquest treball, així com en l'annex 1 ("Relació entre el pas del vehicle pesant i la força de pretensat variable"), on es desenvolupa la relació entre l'avenç del comboi de transport sobre el pont i la força de pretensat necessària que cal aplicar.

Pretensat extradossat

Sistema usat en ponts que és a mig camí entre el sistema de bigues pretensades i el sistema de pont atirantat. Extradossat es refereix a l'augment d'excentricitat del pretensat, mitjançant uns pilars relativament curts per sobre de l'estructura on s'ancora el pretensat en els extrems de la biga. En el pretensat extradossat aquests pilars són considerablement més curts que en ponts atirantats.

En la figura 1.3 es mostra el pont sobre el riu Deba, a Guipúzcoa, que és un exemple molt típic de pont amb pretensat extradossat.



Figura 1.3.- Pont amb pretensat extradossat (Font: http://estructurando.net/2018/05/07/los_puentes_extradossados/)

En aquest treball es proposa un sistema de pretensat extradossat situat fora de l'estructura del pont. Es tracta d'un sistema amb bigues saltadores a les quals s'acobla un sistema de pretensat exterior i de força variable.

El nom, creat per l'autor d'aquest treball, de "bigues saltadores amb pretensat extradossat", fa referència a l'augment de l'excentricitat del traçat del pretensat amb elevacions en els extrems de les bigues, semblants al cas de l'extradossat de ponts.

Bigues saltadores amb pretensat extradossat

És el terme utilitzat per l'autor per referir-se a una tècnica totalment innovadora, i proposta final del present treball, que combina el sistema de pretensat exterior (de força variable), la tècnica de bigues saltadores, i la filosofia del pretensat extradossat.

La idea fonamental d'aquest sistema estructural és intentar elevar el recolzament central de les bigues saltadores al mig del pont mitjançant el pretensat, de manera que la càrrega que finalment arriba al pont quedi considerablement reduïda, i que sigui assumible per l'estructura del pont.

En la figura 1.4 es mostra de manera esquematitzada el sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat, on s'observen les parts principals del sistema, com són les pròpies bigues, els recolzaments extrems i central i el sistema de pretensat, que inclou una estructura auxiliar paral·lela a les bigues.

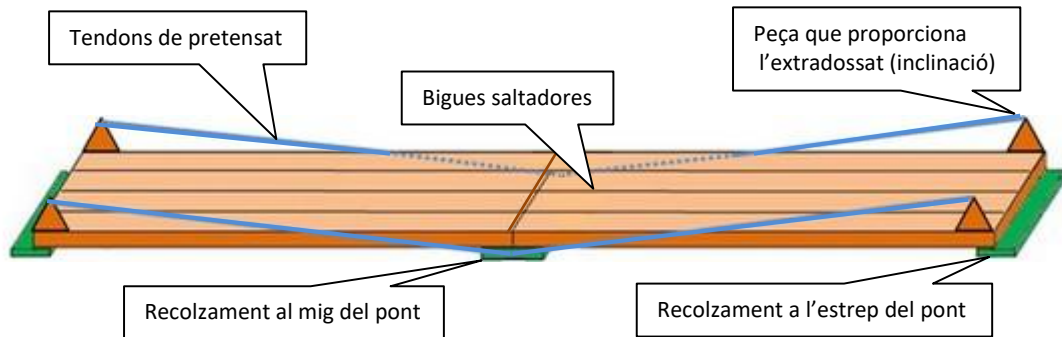


Figura 1.4.- Esquema de bigues saltadores amb pretensat extradossat. (Font: elaboració pròpia)

Les dimensions de cada element d'aquest sistema s'han estudiat de manera orientativa en aquest treball, i s'ha arribat a la conclusió que serien de mides molt raonables.

Es preveu que, un cop el sistema estigués creat industrialment, seria relativament molt ràpid col·locar-lo sobre un pont, i tan sols requeriria un o dos vehicles de transport amb un braç grua.

CAPÍTOL 2:

ESTAT ACTUAL DEL REFORÇ PROVISIONAL DE PONTS

2.1.- INTRODUCCIÓ

En aquest capítol analitzarem primerament quan cal reforçar els ponts per al pas de combois de transport especialment pesants. Ho farem de manera particular en relació a la normativa de ponts espanyola IAP-11, que bàsicament reflecteix el que recullen l'Eurocodi 0, de bases de càlcul, i l'Eurocodi 1, d'accions sobre les estructures. Tanmateix, aquesta anàlisi es pot fer igualment tenint en compte altres normatives de ponts vigents en altres països.

Posteriorment analitzarem breument els dos sistemes més utilitzats actualment per al reforç provisional de ponts, que són els apuntalaments i les bigues saltadores. Quedarà palesa la seva gran utilitat dins un camp relativament reduït de casos i al mateix temps se'n mostraran les limitacions.

Finalment farem un estudi qualitatiu de la tècnica de pretensat exterior, la qual ha servit d'inspiració a l'hora de desenvolupar les idees bàsiques d'aquest treball.

2.2.- NECESSITAT DE REFORÇAR PONTS DE MANERA PROVISIONAL

Per tal de saber si caldrà reforçar un pont per al pas d'un comboi especialment pesant, que sobrepassa les càrregues normalment permeses per al transport per carretera, en primer lloc cal conèixer exactament les característiques de la càrrega a transportar i, en segon lloc, conèixer la capacitat portant del pont.

Les càrregues que representen transports especials pesants poden ser de l'ordre de centenars de tones, com el de la figura 2.1 i, per tant, són clarament molt superiors al pes permès dels vehicles pesants habituals, que és de l'ordre de 30-40 tones aproximadament, depenent del context on es troben.



Figura 2.1.- Transport especial. (Font: <https://www.baycrane.com/product/self-propelled-modular-transporter/>)

Tot i així, no estudiarem la necessitat de reforç d'un pont en relació a la càrrega total sinó en relació als esforços que es preveuen en l'estructura resistent deguts a aquesta càrrega, i en particular ens interessarà estudiar els moments flectors.

Treballarem en termes de resistència, és a dir, en termes d'estats límits últims (E.L.U.) i no en termes de deformabilitat o estats límits de servei (E.L.S.), ja que el que volem saber és si podem danyar el pont des del punt de vista tensional.

Així mateix, assumirem que podríem provocar deformacions momentànies relativament grans (majors que $l/1000$, que sol ser el límit habitual per ponts de carretera), però en tot cas reversibles, ja que, com a premissa, en situar-nos dins el rang de tensions de càlcul del pont, treballarem sempre en termes de deformació elàstica.

2.2.1.- Capacitat portant dels ponts

Una manera molt intuïtiva i senzilla per conèixer les càrregues que suporta un pont és analitzar les càrregues de disseny del pont, cosa que, *a priori*, farem analitzant la normativa que el pont hauria de complir en el moment de la seva construcció.

Aquesta anàlisi pot ser, però, insuficient en alguns casos, depenent del país on es troba el pont ja que, molt probablement, no a tot arreu les normes constructives es compleixen de manera igualment estricta. Al mateix temps, l'estat actual d'un pont, a causa de problemes de durabilitat, pot ser deficient en relació a la resistència projectada inicialment.

Tot i així, per desenvolupar aquest treball de caire acadèmic, amb recursos limitats de temps i de disponibilitat d'equipaments, partirem de les dades de la normativa. En aquest cas, ens referirem a la normativa espanyola IAP-11, i

considerarem ponts que mantenen les seves prestacions resistents al llarg del temps, és a dir, sense problemes de durabilitat.

Els passos que seguirem per determinar la capacitat portant d'un pont es detallen a continuació:

1) Carrils virtuals

Calcularem el nombre de carrils virtuals (n_i) i l'amplada d'aquests carrils (w_i). L'amplada de la plataforma (w) és tota la superfície apta per al trànsit rodat. Ho farem segons la taula 2.1 presa de la taula 4.1.a de normativa IAP-11.

TABLA 4.1-a DEFINICIÓN DE LOS CARRILES VIRTUALES

ANCHURA DE LA PLATAFORMA (w)	NÚMERO DE CARRILES VIRTUALES (n_i)	ANCHURA DEL CARRIL VIRTUAL (w_i)	ANCHURA DEL ÁREA REMANENTE
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_i = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \leq w < 6 \text{ m}$	$n_i = 2$	$w/2$	0
$w \geq 6 \text{ m}$	$n_i = \text{ent}(w/3)$	3m	$w - 3 n_i$

Taula 2.1.- Definició dels carrils virutals

2) Càrregues

Considerarem les càrregues simultànies degudes al pas de vehicles, que s'idealitzen segons els valors indicats a la taula 2.2 presa de la taula 4.1.b de la normativa IAP-11.

TABLA 4.1-b VALOR CARACTERÍSTICO DE LA SOBRECARGA DE USO

SITUACIÓN	VEHÍCULO PESADO $2Q_{ik}$ [KN]	SOBRECARGA UNIFORME q_{ik} (ó q_{rk}) [KN/m ²]
Carril virutal 1	2 · 300	9,0
Carril virutal 2	2 · 200	2,5
Carril virutal 3	2 · 100	2,5
Otros carriles virtuales	0	2,5
Área remanente (q_{rk})	0	2,5

Taula 2.2.- Valor característic de la sobrecàrrega d'ús

3) Esquematitzar les càrregues

En un estudi previ analitzaríem només les accions a nivell longitudinal segons la llum del pont, però en un estudi més detallat hauríem de tenir en compte les càrregues en dues dimensions sobre el taulell del pont.

En la figura 2.2 es mostra l'esquema de les accions que cal considerar en un exemple amb 3 carrils virtuals segons la normativa IAP-11.

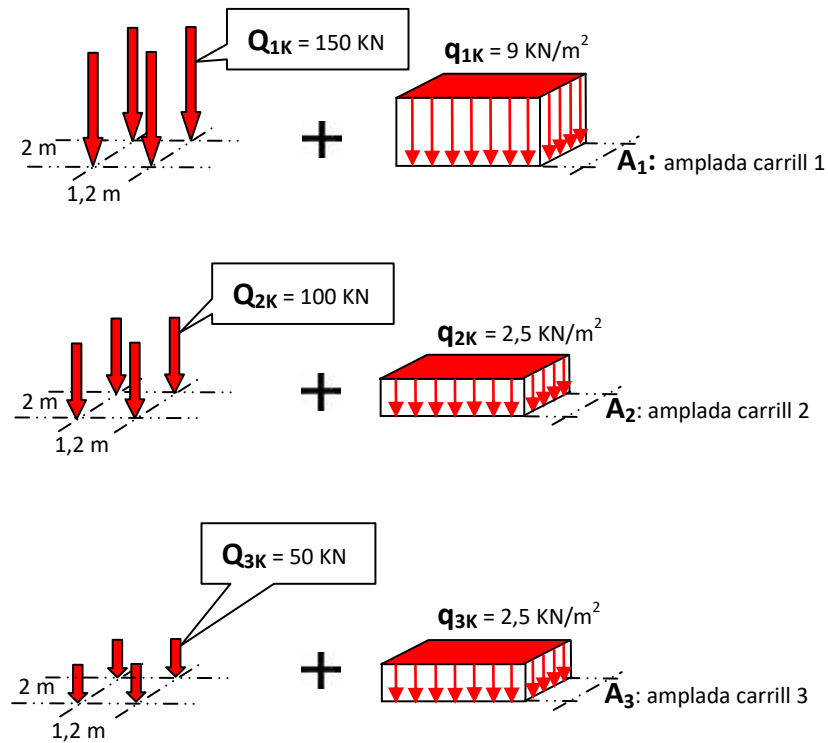


Figura 2.2.- Esquema de càrregues característiques de sobrecàrrega d'ús

4) Fem l'anàlisi de situació més desfavorable

Estudiem els M^+ (moments flectors positius) del taulell del pont depenent del model estructural de pont que tinguem. El desenvolupament d'aquest treball se centra en ponts de bigues isostàtiques birecolzades, ja que són el cas amb M^+_{\max} majors, comparats amb ponts de la mateixa llum però amb estructura de biga contínua.

Col·locarem totes les càrregues puntuals (Q_{ik}) $\pm 0,6 \text{ m}$ del centre de la llum (separació entre càrregues de $1,2 \text{ m}$ segons la normativa IAP-11) i les càrregues distribuïdes (q_{ik}) al llarg de tota la llum i ocupant l'amplada corresponent al "carril virtual_i" (A_i) i a la de l'àrea romanent (A_r). En la figura 2.3 es mostra el tren de càrregues característiques vist longitudinalment, més desfavorable.

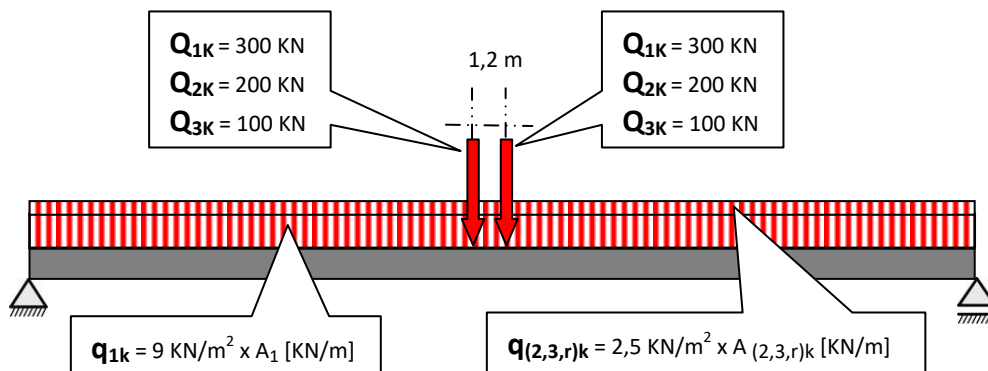


Figura 2.3.- Sobrecàrregues d'ús característiques ($_{K}$).

5) Coeficient parcial majorador

Com s'indica en la taula 2.3, que mostra una part de la taula 6.2.b de la IAP-11, per a les accions desfavorables de la sobrecàrrega d'ús prendrem el coeficient $\gamma_f = 1,35$.

**TABLA 6.2-b COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS ACCIONES γ_f
(PARA LAS COMPROBACIONES RESISTENTES)**

ACCIÓN		EFECTO	
		FAVORABLE	DESFAVORABLE
Variable	Sobrecarga de uso	0	1,35

Taula 2.3.- Coeficient parcial (γ_f) per a les accions

Aquest coeficient l'aplicarem a les carregues característiques per obtenir les carregues de càlcul, com s'indica en l'apartat següent.

6) Càrregues de càlcul

Apliquem el coeficient del punt anterior i en resulten les carregues de càlcul. Sumem les carregues puntuals de càlcul i les carregues repartides de càlcul. Per simplificació en la nomenclatura definim els valors següents, que utilitzarem al llarg d'aquest desenvolupament:

$$F = \sum (Q_{ik} \cdot 1,35) \text{ [KN]}$$

F: força puntual total

$$q = \sum (q_{ik} \cdot 1,35) \text{ [KN/m]}$$

q: càrrega distribuïda total

Per exemple, per 2 carrils de 3m d'amplada cada un, tindríem:

$$F = (300 + 200) \cdot 1,35 = 500 \cdot 1,35 = 675 \text{ KN}$$

$$q = ((9 \cdot 3) + (2,5 \cdot 3)) \cdot 1,35 = 34,5 \cdot 1,35 = 46,6 \text{ KN/m}$$

7) Anàlisi estructural

Posteriorment fem una anàlisi estructural dels esforços en la biga birecolzada amb l'esquema de carregues de forces puntuals i de forces distribuïdes. Com s'ha comentat anteriorment, ens centrem en l'esquema longitudinal del pont. En un estudi exhaustiu s'haurien de fer també comprovacions a nivell transversal del pont. Les sol·licitacions totals al centre de llum (moments flectors) són, per biga birecolzada:

$$M_R = M_{\max(F)}^+ + M_{\max(q)}^+$$

$$M_R = (q \cdot L^2 / 8) + (0,5 F \cdot L) - (0,6 F) \text{ [KNm]}$$

M_R : Màxim moment [KNm] degut a sobrecàrregues d'ús, que el pont resisteix al centre de la llum.

q: Total càrrega distribuïda de càlcul: [KN/m]

L: Longitud total del pont [m]

F: Càrrega puntual de càlcul [KN]

En la figura 2.4 es mostra l'esquema estructural per obtenir la fórmula anterior.

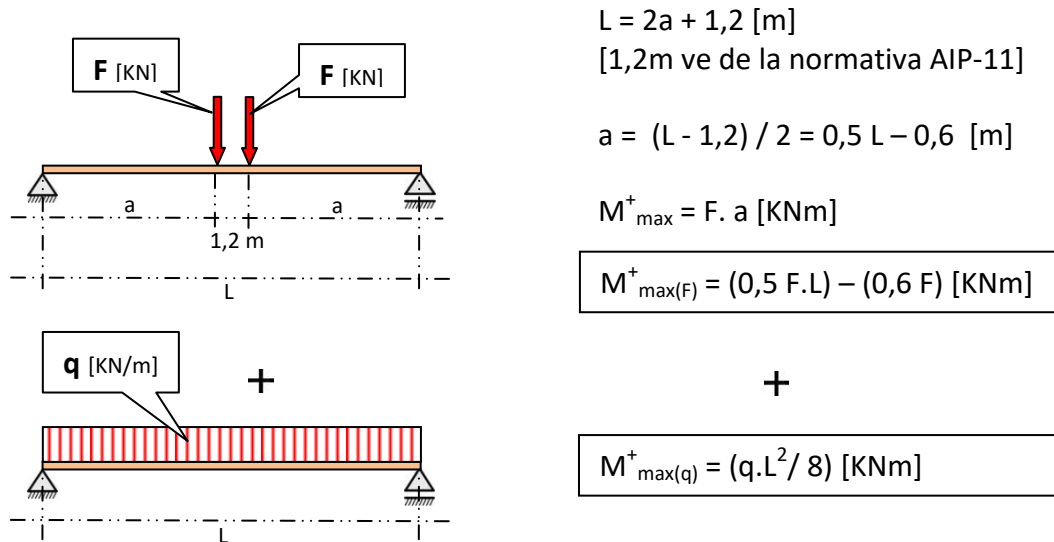


Figura 2.4.- Esquema de sobrecàrregues d'ús de càlcul

En la figura 2.5 es mostra gràficament l'anterior expressió matemàtica del màxim moment que resisteixen els ponts isostàtics en el centre de la llum. Es mostra amb diferents colors la resistència de ponts per a diverses amplades.

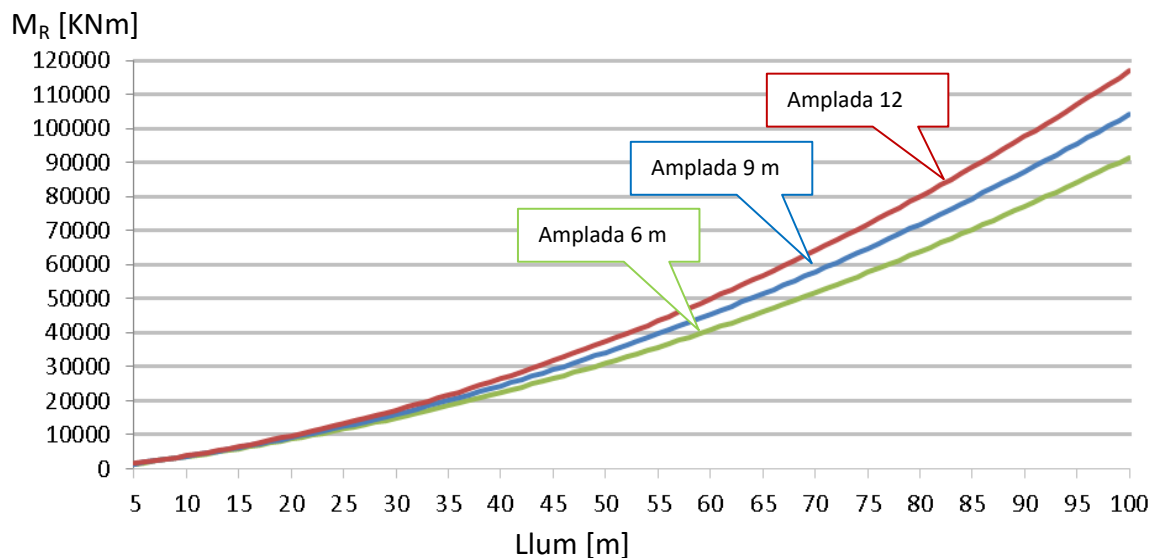


Figura 2.5.- Resistència dels ponts.

Aquesta resistència calculada pels ponts s'estudia principalment en relació als moments flectors màxims al centre de la llum, però caldria fer altres comprovacions tenint en compte les envoltants d'esforços, tant flectors, tallants, axils com torsors.

2.2.2.- Anàlisi de quan cal reforçar els ponts

Procedirem de manera similar a la descrita anteriorment, buscant la situació de càrrega més desfavorable durant el pas de la càrrega excepcional per sobre el pont. Continuant amb ponts de biga isostàtica, la posició més desfavorable per als moments flectors positius (M^+) és amb la càrrega centrada al pont.

En aquest cas, normalment aplicarem un coeficient $\gamma_f \approx 1$ (punt 7 de l'apartat anterior), ja que coneixem perfectament la sobrecàrrega i l'aplicarem de manera molt lenta, sense que es produeixin efectes dinàmics sobre l'estructura.

Cada transport especial tindrà les seves pròpies característiques de pes total, amplada i llargada del comboi, total nombre d'eixos i càrrega per a cada eix, i caldria fer un estudi detallat de la sol·licitació que el comboi de transport exerceix sobre el pont; tanmateix, per una primera aproximació considerarem la càrrega total del comboi com una càrrega distribuïda i de valor uniforme.

Per simplificar els càlculs posteriors, i per poder generalitzar l'estudi, definim un factor de forma, que relaciona la longitud de la càrrega repartida amb la longitud del pont, tal i com es mostra a la figura 2.6.

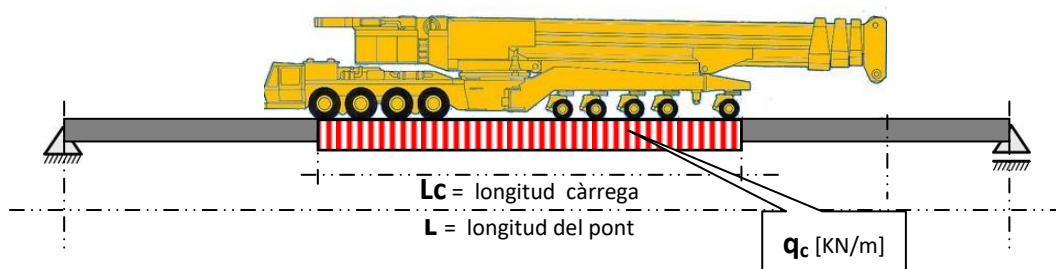


Figura 2.6.- Factor de forma i idealització de la càrrega del comboi pesant.

Definim el factor de forma de la següent manera:

$$f = L_c / L \quad [\text{adimensional}]$$

f: factor de forma

L_c : Longitud del comboi

L : Longitud del pont

Amb algunes consideracions estructurals relativament senzilles, trobem l'expressió matemàtica següent:

$$M_s = (q_c L^2 / 8) (2f - f^2) \quad [\text{KNm}]$$

M_s : Màxim moment de sol·licitació degut al comboi de càrrega [KNm]

q_c : Càrrega distribuïda del comboi [KN/m]

L : Longitud total del pont [m]

f: factor de forma, definit anteriorment [adimensional]

En la figura 2.7 es mostra la representació gràfica de l'expressió trobada del màxim moment flector de sol·licitació (M_s) degut al pes del vehicle, en aquest cas per una càrrega de comboi $q_c = 50 \text{ KN/m}$.

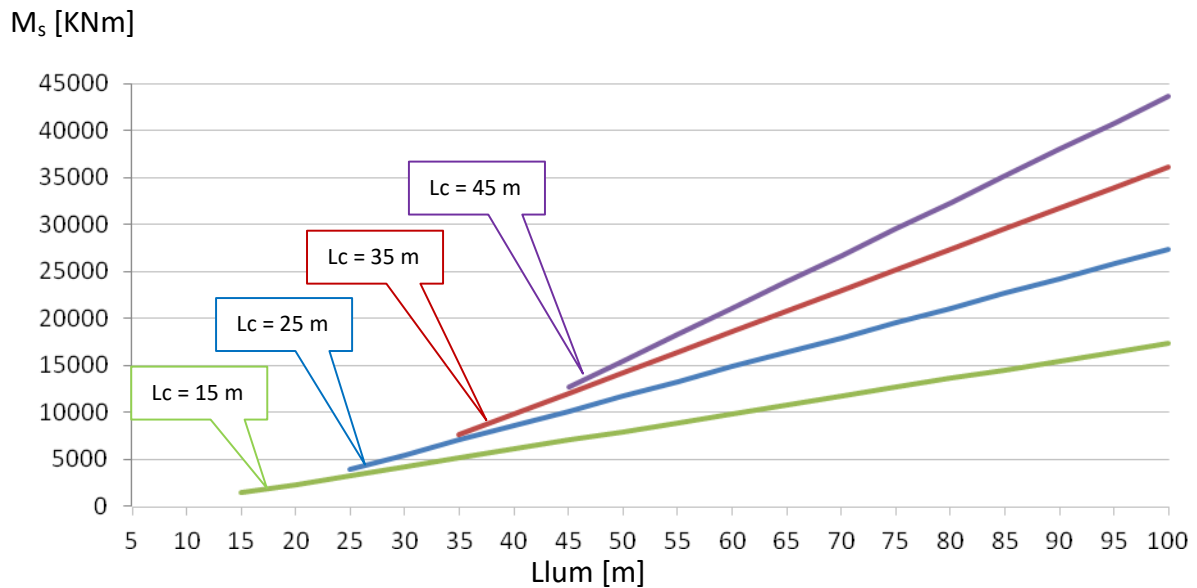


Figura 2.7.- Moment de sol·licitació. "Lc" indica la longitud del comboi.

En la figura 2.8 es mostren els valors del màxim moment flector produït al centre de la llum del pont deguts al pas del vehicle sobre el pont.

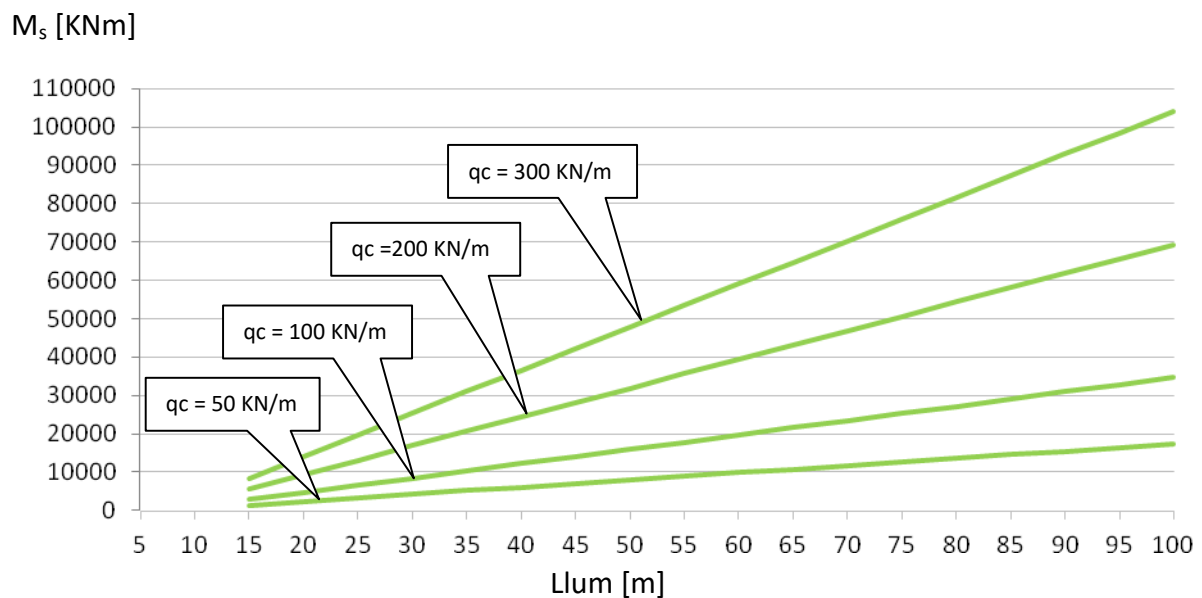


Figura 2.8.- Moment de sol·licitació degut al pes del vehicle. "qc" és la càrrega del comboi.

Cal dir que les càrregues $[\text{KN/m}]$ considerades en aquest exemple són teòriques, sense tenir en consideració les màximes càrregues que serien permeses segons les diferents normatives de carreteres i de ponts que hi ha en diferents països, les quals són generalment molt inferiors a les més altes mostrades en el gràfic.

Finalment comparem la sol·licitació produïda pel vehicle pesant i la sol·licitació calculada com a resistència del pont. Ho podem fer analíticament utilitzant les expressions, trobades anteriorment, dels moments de resistència (M_R : el que resisteix el pont) i el de sol·licitació (M_S : el que provoca la càrrega extraordinària)

$$M_R = (q L^2 / 8) + (0,5 F.L) - (0,6 F) \text{ [KNm]}$$

$$M_S = (q_c L^2 / 8) (2f - f^2) \text{ [KNm]}$$

$$M_{TOTAL} = M_R - M_S$$

$$M_{TOTAL} = (L^2 / 8) (q - q_c (2f - f^2)) + (0,5 F.L) - (0,6 F) \text{ [KNm]}$$

$M_{TOTAL} \geq 1 \rightarrow$ no cal reforçar el pont

$M_{TOTAL} < 1 \rightarrow$ cal reforçar el pont

M_R : Màxim moment, degut a sobrecàrrega d'ús, que el pont resisteix [KNm]

M_S : Màxim moment de sol·licitació degut comboi de càrrega [KNm]

q : Total càrrega distribuïda de càlcul: [KN/m]

q_c : Càrrega distribuïda del comboi [KN/m]

F : Càrrega puntual de càlcul [KN]

L : Longitud total del pont (de biga birecolzada) [m]

L_c : Longitud del comboi [m]

f : factor de forma

$$f = L_c / L \text{ [adimensional]}$$

A mode d'exemple, en les figures 2.9 – 2.20 visualitzem aquesta expressió matemàtica amb les variacions següents:

- Càrrega que representa el comboi: 50 KN/m, 100 KN/m, 200 KN/m i 300 KN/m
- Amplada del pont: 6 m, 9m i 12 m
- Longitud del pont: de 5 m a 100 m.
- Longitud del comboi (L_c): 15 m, 25 m, 35 m, 45m
- Càrrega que representa el comboi (q_c): 50 KN/m, 100 KN/m, 200 KN/m, 300 KN/m

Amb això cobrim molts casos de pes total del comboi d'entre:

$$15m \times 50 \text{ KN/m} = 750 \text{ KN (75 tones)} \text{ fins a } 45m \times 300 \text{ KN/m} = 13.500 \text{ KN (1.350 tones)}$$

M_{TOTAL} [KNm]

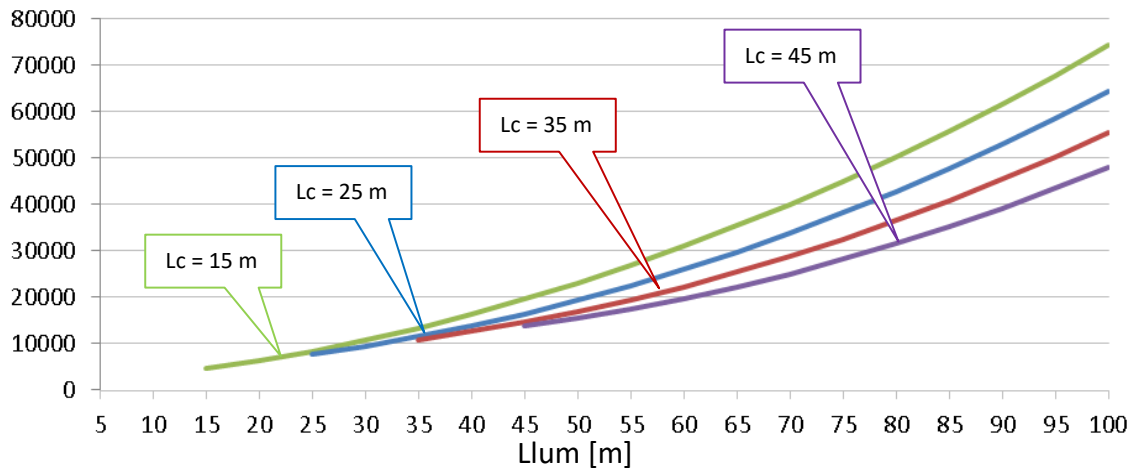


Figura 2.9.- M_{TOTAL} per $q_c = 50$ KN/m i amplada pont 6 m.

M_{TOTAL} [KNm]

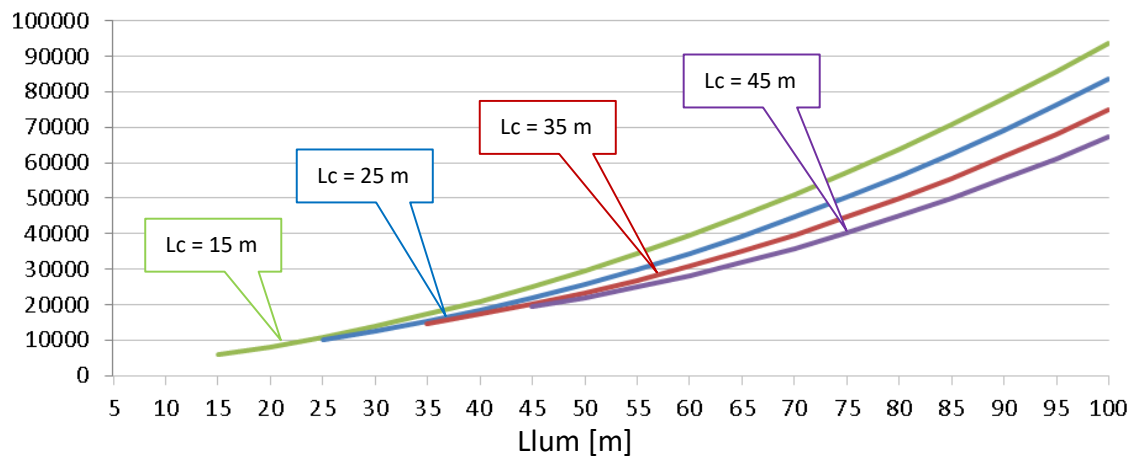


Figura 2.10.- M_{TOTAL} per $q_c = 50$ KN/m i amplada pont 9 m.

M_{TOTAL} [KNm]

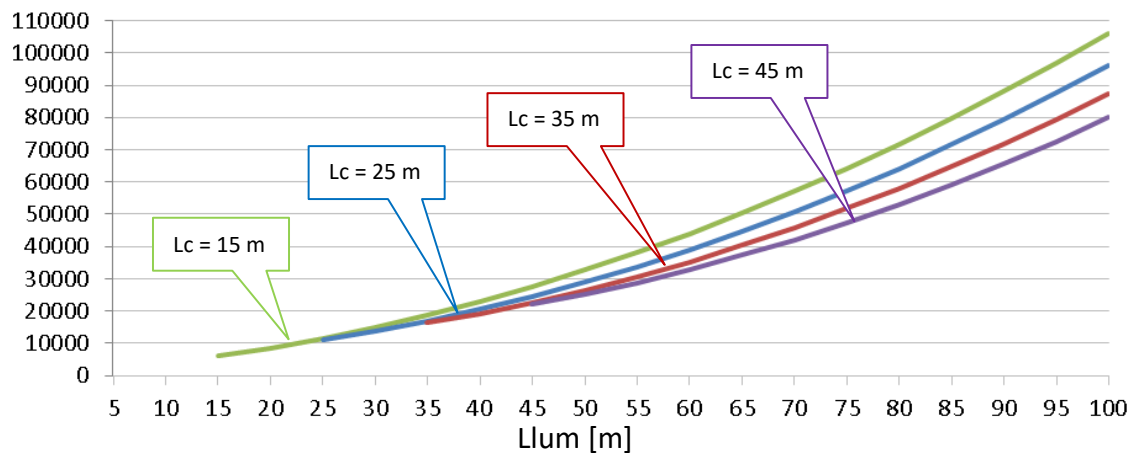


Figura 2.11.- M_{TOTAL} per $q_c = 50$ KN/m i amplada pont 12 m.

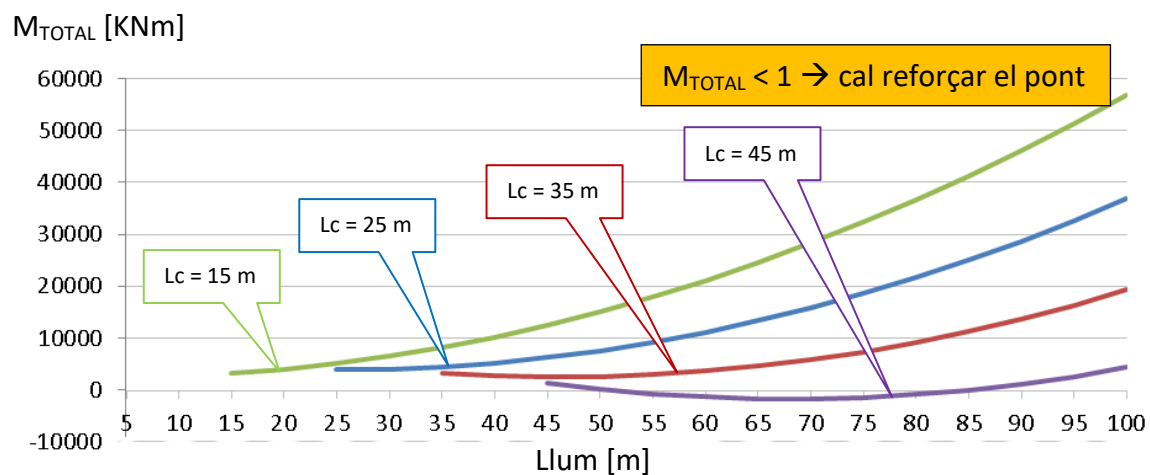


Figura 2.12.- M_{TOTAL} per $q_c = 100$ KN/m i amplada pont 6 m.

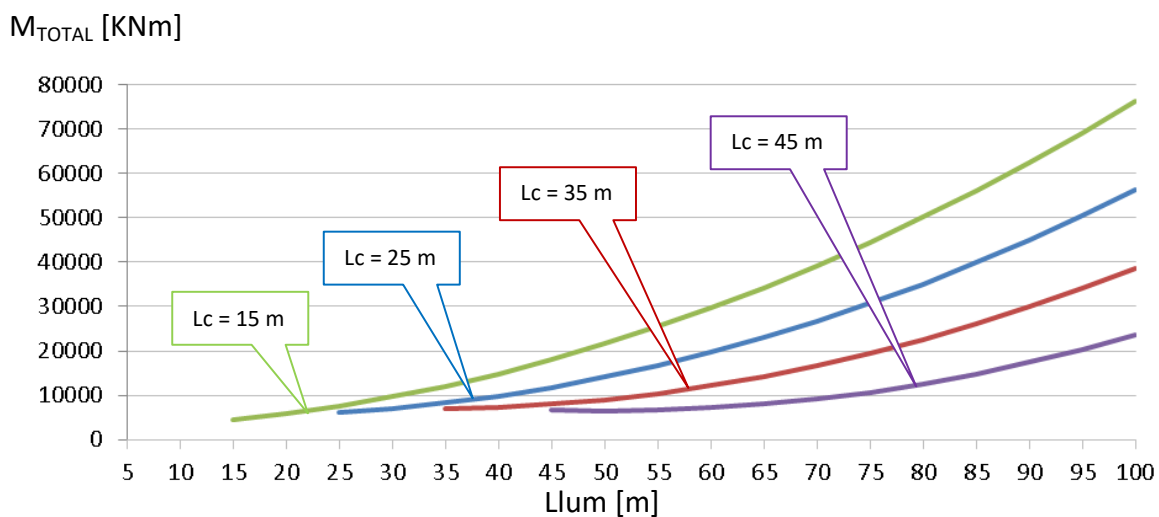


Figura 2.13.- M_{TOTAL} per $q_c = 100$ KN/m i amplada pont 9 m.

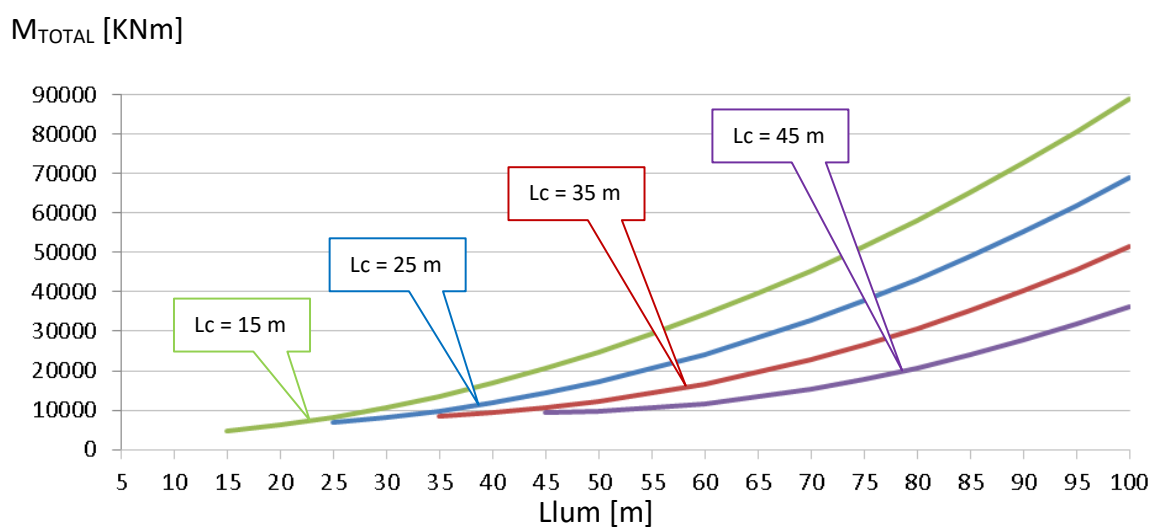


Figura 2.14.- M_{TOTAL} per $q_c = 100$ KN/m i amplada pont 12 m.

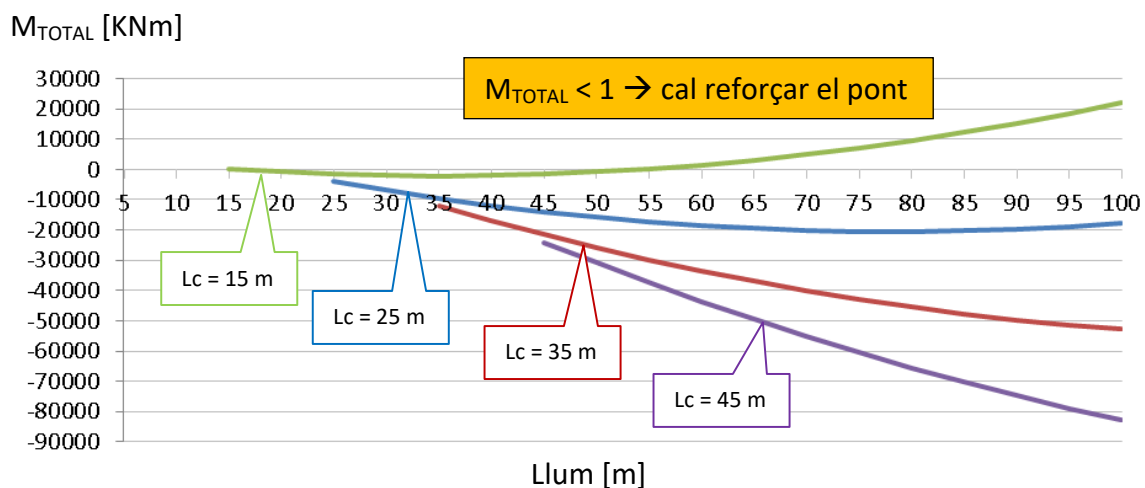


Figura 2.15.- M_{TOTAL} per $q_c = 200$ KN/m i amplada pont 6 m.

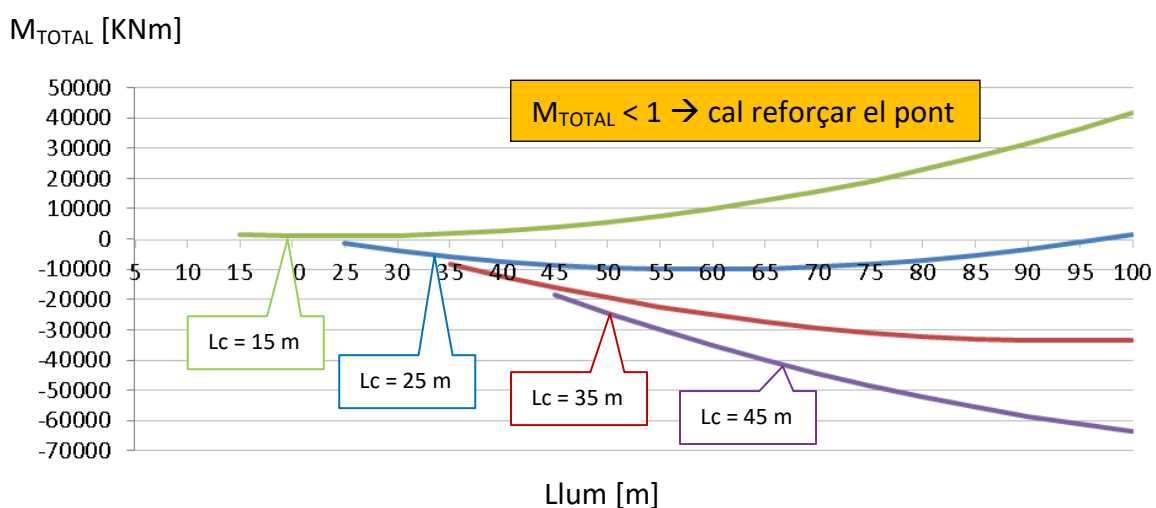


Figura 2.16.- M_{TOTAL} per $q_c = 200$ KN/m i amplada pont 9 m.

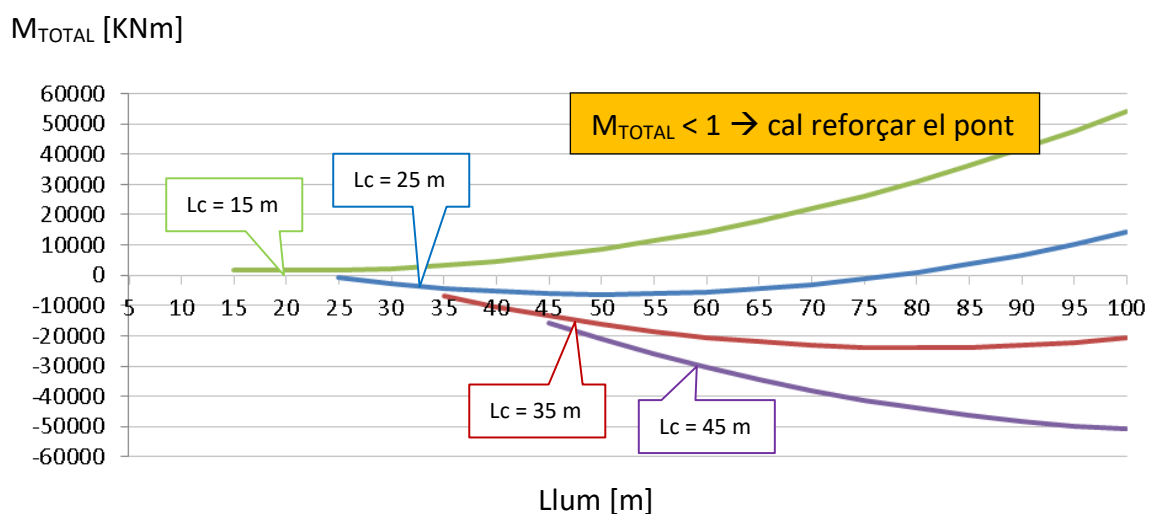


Figura 2.17.- M_{TOTAL} per $q_c = 200$ KN/m i amplada pont 12 m.

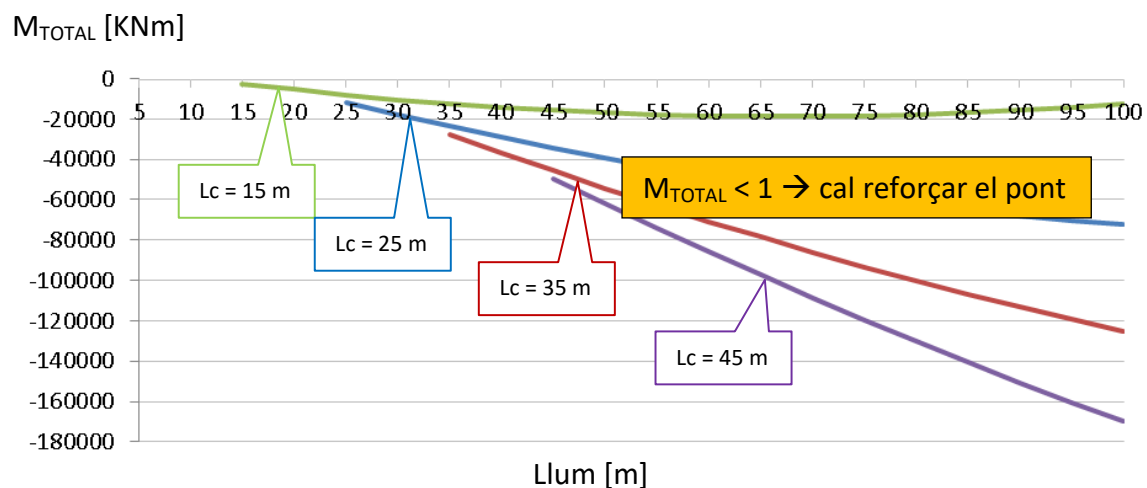


Figura 2.18.- M_{TOTAL} per $q_c = 300$ KN/m i amplada pont 6 m.

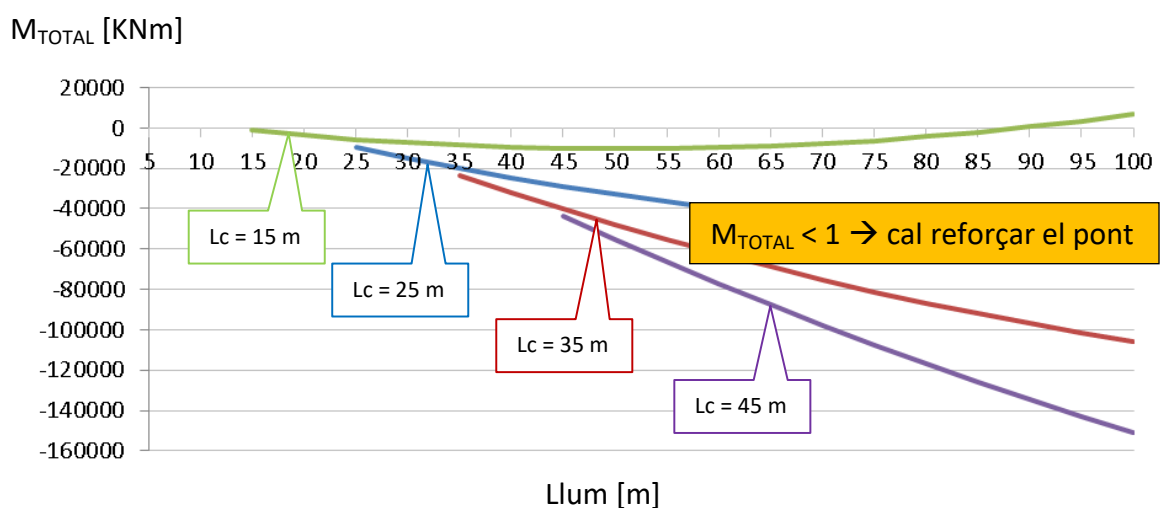


Figura 2.19.- M_{TOTAL} per $q_c = 300$ KN/m i amplada pont 9 m.

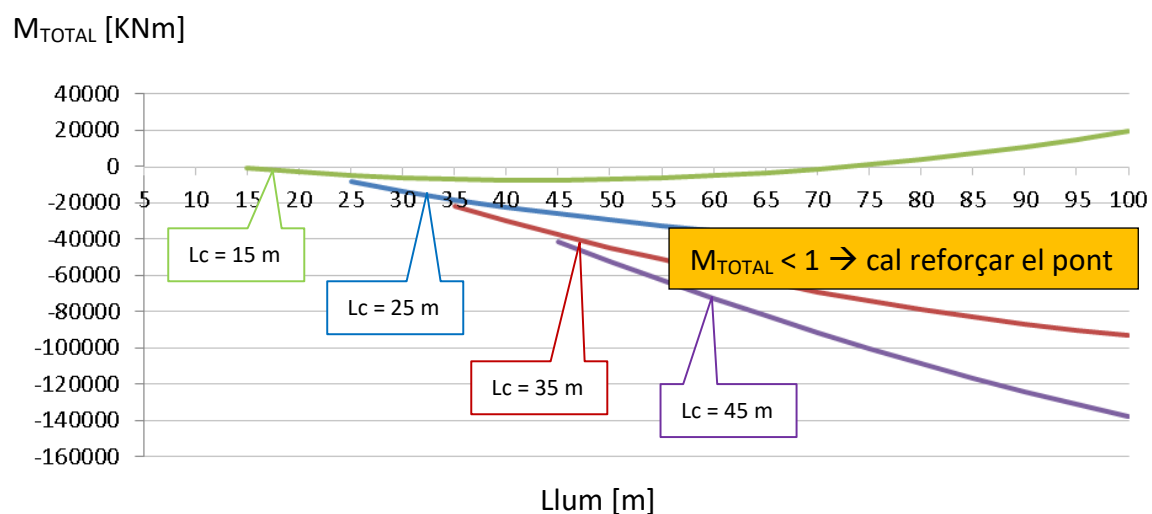


Figura 2.20.- M_{TOTAL} per $q_c = 300$ KN/m i amplada pont 12 m.

Analitzant aquests gràfics del les figures 2.9 – 2.20 podem extreure’n les conclusions següents:

- Com més ample és el pont més capacitat portant té en relació a la sol·licitació del comboi de càrrega. Això és lògic, ja que la càrrega de disseny augmenta amb l’amplada del pont.
- En general, els ponts llargs però estrets, dissenyats amb la normativa espanyola de ponts, estan poc preparats per suportar càrregues extraordinàries.
- Com més llarg és el comboi de càrrega, a igualtat de càrrega per metre lineal, major és la necessitat de reforçar el pont. Això és lògic perquè el pes total del comboi augmenta.
- En general, fins a pesos totals de comboi d’unes 300 tones no tindrem necessitat de reforçar ponts (però caldria comprovar-ho per a cada cas concret).
- Amb aquesta anàlisi no es pot afirmar que a partir d’una certa llum els ponts no s’han de reforçar. Al contrari, a major llum, en general cal un reforç major per a la mateixa càrrega excepcional.
- Combois de càrrega a partir d’uns 200KN/m requereixen que el pont s’hagi de reforçar. Cal dir que aquestes són càrregues per metre lineal superiors a les habituals permeses en dimensionament de calçades, però que es poden assolir en combois especialment pesants, ja que aquests combois especials compleixen les limitacions de pressió sobre la calçada, mitjançant l’ús de moltes rodes per a cada eix.

2.3.- REFORÇ PROVISIONAL DE PONTS

Actualment s’utilitzen bàsicament dos sistemes o tècniques per reforçar ponts davant el pas de vehicles extremadament pesants: els apuntalaments i les bigues saltadores. Són sistemes molt útils i senzills d’usar dins d’un tipus relativament reduït de ponts.

En concret, els apuntalaments es poden utilitzar per a ponts d’altura lliure bastant reduïda depenent dels puntals dels quals disposem, però habitualment fins a uns 5m d’altura, que és la mida màxima de molts apuntalaments estandarditzats. Cal que la superfície sota el pont sigui transitable per a tal efecte.

Les bigues saltadores tenen, en canvi, la possibilitat d’utilitzar-se en més casos, ja que s’usen independentment de l’altura lliure sota el pont; per contra, el seu ús està limitat a les mides de les bigues de les quals disposem, que són de l’ordre d’uns 25 metres com a màxim. Seguidament analitzem alguns aspectes estructurals d’aquestes solucions.

2.3.1.- Apuntalaments

L'apuntalament de ponts consisteix a col·locar unes peces allargades i telescòpiques (puntals) en posició vertical sota el pont a reforçar. Els puntals més utilitzats són de fins a 3 o 5m de llargada, dimensions habituals en processos constructius d'habitatges.

La figura 2.21 mostra un exemple d'apuntalament d'un pont per al pas d'un comboi especialment pesant. En la imatge s'observa una equidistància entre puntals de l'ordre de 0,5-1m aproximadament, cosa que és molt habitual en apuntalaments. També s'observa que l'altura lliure sota el pont és petita i que el terreny és transitable, condicionants molt importants per poder utilitzar puntals.



Figura 2.21.- Reforç provisional d'un pont amb puntals. Font (<http://www.transmodal.es/sites/default/files/Ingenieria/Apuntalamiento.jpg>)

Els puntals de construcció han de complir la normativa corresponent, que en el cas del nostre entorn geogràfic és la UNE-EN 1065, que en regula les característiques resistents i les normes d'utilització.

Els puntals són molt fàcils de col·locar, gràcies al seu funcionament tècnicament molt senzill i al seu pes relativament reduït, i són molt fàcils d'obtenir, ja s'utilitzen sovint dins del món de la construcció.

Un altre avantatge és que, a priori, no cal fer gaires consideracions estructurals per dissenyar-ne la disposició més enllà que quedin estables i que la càrrega provinent del vehicle sigui absorbida pel nombre necessari de puntals. Això si no es vol sol·licitar l'estructura del pont; si no, si es permet que l'estructura del pont treballi, encara en caldrien menys.

En l'exemple següent es mostra, de manera molt simplificada, com podria fer-se un càlcul per decidir la distribució de puntals sota un pont:

Si el comboi pesa 700 Tn i té una llargada de 23 m, la càrrega distribuïda sobre el pont seria d'uns 300 kN/m. Caldria, doncs, posar, com a molt, puntals que ofereixin la mateixa resistència per metre lineal.

Si tinguéssim puntals que resisteixen 30 KN amb la llargària necessària i si el pont a travessar tingués per exemple una amplada de 10 m, caldrien 10 puntals per cada metre lineal de pont, que en aquest cas representaria col·locar un puntal cada metre, en amplada i en llargada, cosa que resulta molt raonable.

Cal tenir present que la tècnica de reforç provisional de ponts amb puntals no es limita a suportar el pas puntual d'una càrrega extrema, sinó que també pot ser una tècnica per a un reforç semipermanent en el temps.

En la figura 2.22 es mostra un exemple d'un reforç semipermanent amb puntals, que es va fer per dotar el pont de més capacitat portant durant un temps limitat. En aquest cas es preveia un augment significatiu del trànsit de vehicles pesants pel pont a causa d'una construcció propera al pont. Reforços semipermanents amb puntals també es poden fer mentre es fa manteniment o reformes d'un pont.



Figura 2.22.- Reforç amb puntals. (Font: <http://www.saveu.cat/article.php?art=2135>)

En casos especials es podria optar per fer apuntalaments més alts de 5 metres, que acostuma ser una llargada típica de puntals.

En la figura 2.23 es mostra un exemple d'ús de cindris de gran capacitat, en aquest cas, per suportar l'estructura d'un pont en construcció. Tècnicament és possible utilitzar un sistema similar a aquest per fer un reforç provisional.



Figura 2.23.- Apuntament amb cindris. (Font: <https://www.ulmaconstruction.es/es-es/proyectos/puentes-viaductos/ap-1-viaducto-basagoiti>)

En la figura 2.24 es mostra una estructura auxiliar metàl·lica, utilitzada en aquest cas com a reforç provisional durant una reparació del pont.



Figura 2.24.- Exemple d'estructura metàl·lica de suport d'un taulell de pont. (Font: https://res.cloudinary.com/dzht99o4n/image/upload/w_713,h_375,c_fill/v1519316236/c12da508e48a075b3ed681036eaf99d3.jpg)

Aquests sistemes d'apuntalar amb cindris o estructures auxiliars, tot i que són factibles tècnicament per reforçar provisionalment un pont, queden pràcticament descartats en la gran majoria de casos on ens plantejem un reforç provisional per al pas d'un vehicle especialment pesant, per la gran quantitat de material necessari, el temps d'execució, les necessitats de maquinària i de mà d'obra i, en definitiva, els costos que se'n derivarien.

Hi ha casos molt concrets, però, on muntar aquestes estructures podria ser una solució a triar, per exemple si necessitem reforçar ponts amb canvis importants de rasant que dificultarien l'ús de bigues saltadores, o també en casos on la resistència portant dels estreps del pont és molt baixa o desconeguda, cosa que també reduiria les possibilitats d'usar bigues saltadores. També en ponts molt peraltats o amb curvatures importants, on les bigues saltadores tampoc es podrien utilitzar.

A nivell estructural, amb l'ús de puntals aconseguim introduir molts recolzaments a l'estructura del pont, i fem que aquesta treballi com a biga contínua de trams amb llums molt curtes.

Amb això disminuïm considerablement el M_{\max}^+ (màxim moment flector positiu) i, per contra, introduïm uns M^- (moments flexors negatius) no desitjables, però plenament assumibles per l'estructura.

Es tracta d'evitar M^- que puguin afectar l'estructura, per la qual cosa caldrà evitar situacions on col·loquem massa pocs puntals. Això és especialment important en bigues isostàtiques, que no estan dissenyades per suportar M^- elevats, al contrari que les bigues contínues (hiperestàtiques), que sí que ho estan.

Cal tenir en compte que el que busquem amb els puntals o, en el seu cas, amb cindris, és principalment disminuir el M_{\max}^+ controlant, al mateix temps que els M^- siguin tolerables, i no pas disminuir la fletxa màxima.

En la figura 2.25 es mostra l'efecte que té sobre la llei de moments flectors d'una biga isostàtica el fet de posar més o menys puntals, en aquest cas, amb una càrrega uniforme unitària i una biga de 10 m. Els valors numèrics són irrelevants però en mostren l'efecte de manera significativa.

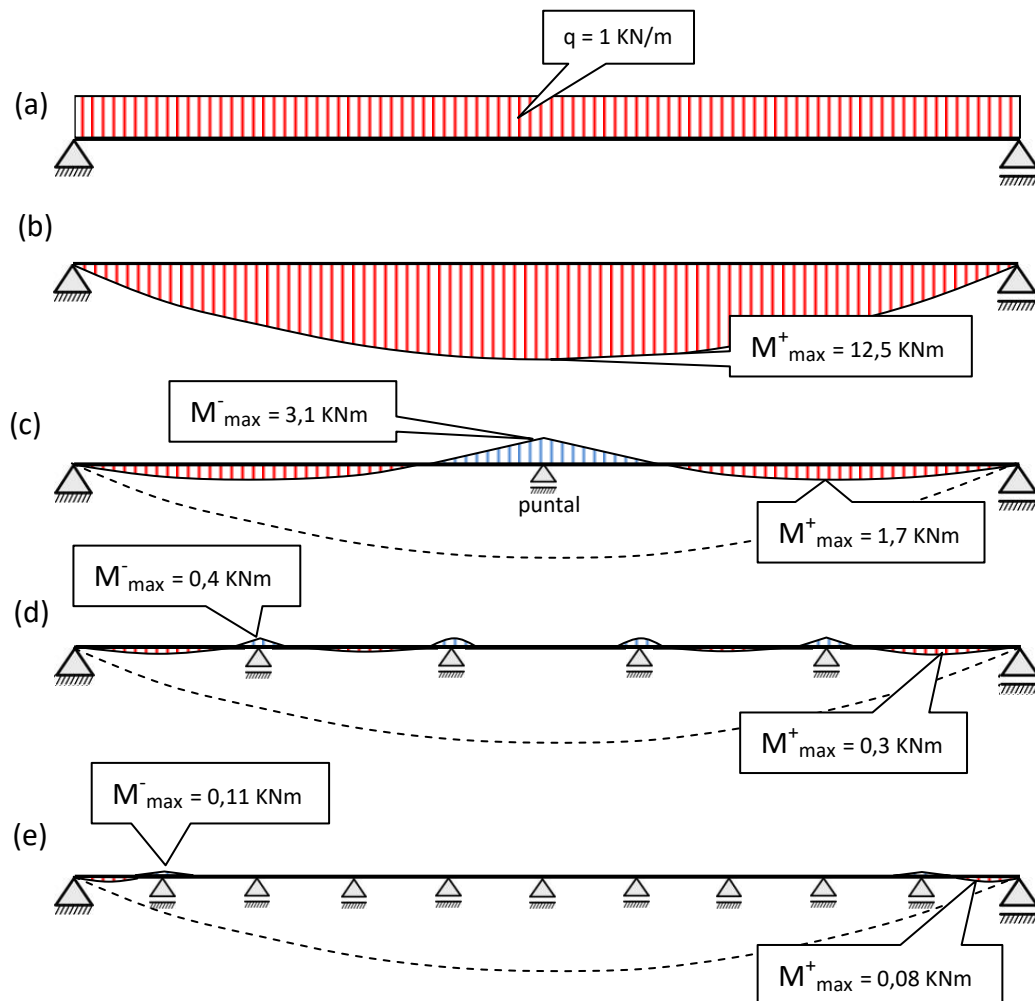


Figura 2.25.- Efecte que provoca sobre les lleis de flectors col·locar puntals.

En la figura anterior s'observa, en l'esquema (b), la llei de flectors de la biga sense cap puntal. Posteriorment en els casos marcats amb (c), (d) i (e) s'observa clarament que a mesura que augmentem el nombre de puntals (recolzaments simples) els moments flectors, tant positius com negatius, es redueixen molt considerablement, fins que queden pràcticament reduïts a zero amb puntals situats amb equidistàncies d'1 m.

És important tenir present un fenomen que es produeix amb l'ús de puntals (o d'altres tipus d'estructures) col·locats com a recolzament simple, que fan que l'estructura passi a treballar com a biga contínua: cal evitar col·locar tan sols un suport al mig de la llum del pont, ja que com s'observa a la figura 2.25 (c) es creen moments flectors negatius al mig de l'estructura, de l'ordre del 25% dels màxims inicials, que podrien perjudicar-la.

Hi ha casos en què es pot voler controlar la fletxa màxima col·locant un puntal (o una altra estructura inferior) al centre de la llum d'una estructura. Fer-ho només amb un suport al centre de la llum seria un error conceptual que, probablement, no es comet quan dissenyem un reforç de ponts, però que pot ser freqüent en l'apuntament d'emergència de forjats danyats.

Com s'observa en la figura 2.26, els esforços tallants també es veuen considerablement reduïts amb la utilització de puntals. La figura mostra aquest efecte, quantificat en aquest cas per una càrrega repartida unitària i una biga de 10 m.

En el cas (c) es veu clarament la inconveniència d'apuntalar l'estructura només amb un puntal al centre de la llum, com passava també amb els moments flectors: en aquest cas els tallants passen de ser zero al centre de la llum a tenir un valor d'un 60% del màxim inicial als extrems.

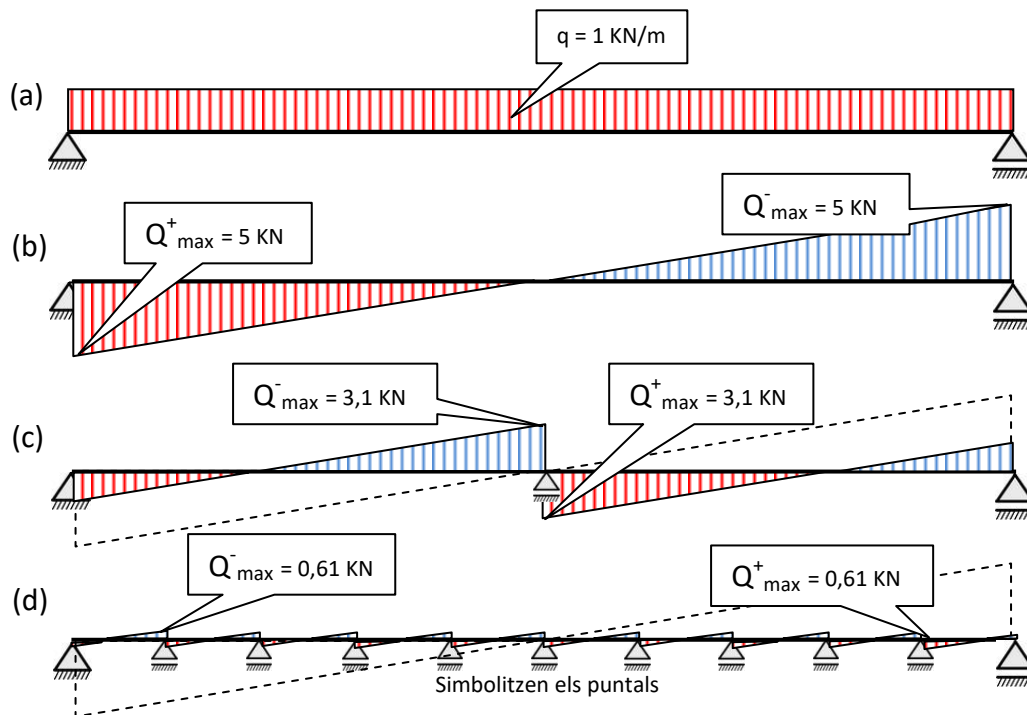


Figura 2.26.- Disminució dels tallants deguts a l'apuntament.

Com s'ha comentat anteriorment, per poder utilitzar puntals per reforçar un pont de manera provisional (o semipermanent) el terreny on els puntals es col·loquen ha de ser accessible i ha de tenir una capacitat portant suficient sense que es deformi excessivament durant el pas de la càrrega pel pont.

Optarem sempre per situacions i tècniques que reparteixin les càrregues sobre el terreny, per exemple usant taulons, i evitarem possibles efectes de punxonament en el terreny per estabilitzar el conjunt de taulons.

Un aspecte a considerar en l'ús de puntals per reforçar ponts és la contrafleixa que es produeix en ponts hiperestàtics quan la càrrega només actua sobre un dels trams, com es mostra en la figura 2.27.

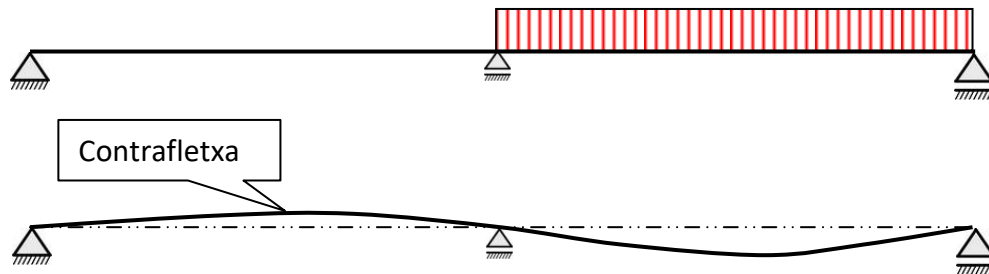


Figura 2.27.- Contrafleixa produïda en el tram no carregat.

Cal assegurar que els puntals no perdin estabilitat a causa d'aquesta contrafleixa, cosa que es podria aconseguir mitjançant la travada longitudinal, en el sentit de l'estructura del pont, usant taulons o altres subestructures de suport.

2.3.2.- Bigues saltadores

El reforç provisional de ponts amb bigues saltadores consisteix en la col·locació d'una estructura resistent sobre el pont a travessar, a base de bigues metàl·liques. En realitat, amb les bigues saltadores no reforcem l'estructura del pont, sinó que evitem sol·licitar-la, ja que aquestes bigues, de longitud major que la llum del pont, es recolzen en els estreps del pont. En la figura 2.28 es mostra un exemple de transport i col·locació de bigues saltadores.

En la figura 2.28 es mostra un exemple de transport i col·locació de bigues saltadores. Es recomana visualitzar el vídeo de l'enllaç, ja que mostra molt clarament el procés que es vol sintetitzar amb aquesta imatge.



Figura 2.28.- Transport i col·locació de bigues saltadores

(Font: imatge presa del vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=689NfLxibp0>)

Les bigues saltadores acostumen a ser un equipament propi de les empreses especialitzades en transports especials, i es poden trobar al mercat amb llargades aproximades de fins a uns 25 m.

Quan es preveu el pas per ponts que cal reforçar, les bigues saltadores s'instal·len amb antelació, just abans del pas comboi especial, per minimitzar l'afectació al trànsit.

En la imatge de figura 2.29 es mostra un exemple d'ús de bigues saltadores per superar un pont de llum relativament molt curta, una solució molt eficaç. En la imatge s'observen les rampes d'accés a les bigues saltadores, que fan al mateix temps la funció de recolzament de les bigues.



Figura 2.29.- Bigues saltadores. (Font: <http://www.dacoheavylift.com/wp-content/uploads/2019/09/project-daco1e-verhuur-materieel-ef3c29b777ed2038215aff8b8543981b.jpg>)

Les bigues saltadores també es poden utilitzar per crear un pont provisional. Això es pot fer quan cal realitzar un transport especial travessant, per exemple, un canal per poder restaurar provisionalment el trànsit per un pont danyat.

En la figura 2.30 es mostren exemples d'utilització de bigues saltadores fent la funció de pont provisional.



Figura 2.30.- Pont provisional de bigues saltadores
(Font: <http://edwardsmoving.com/wp-content/uploads/2014/06/2014-EMR-Brochure.pdf>)

Les bigues saltadores es dimensionen amb criteris resistents, la qual cosa permet que tinguin unes dimensions relativament petites, comparat amb el que seria dimensionar-les si haguessin de complir restriccions de deformació.

2.3.3.- Avantatges i limitacions dels sistemes actuals

Sintetitzant l'exposat fins aquí podem dir que:

- Els apuntalaments són un sistema de reforç provisional adequat per a ponts amb altura lliure màxima d'5 m, sempre i quan la superfície sota el pont sigui transitable.
- El reforç amb apuntalaments pot tenir avantatges davant altres sistemes per reforçar ponts en trams de corba i en ponts amb canvis de rasant importants.
- Els reforços amb apuntalaments són senzills de calcular i els puntals són senzills d'instal·lar, ja que requereixen mà d'obra poc especialitzada.
- L'ús de bigues saltadores és molt avantatjós per a ponts de llums fins a uns 25 m, independentment de l'altura lliure sota el pont, amb el condicionament de poder disposar d'aquests equipaments.
- Les bigues saltadores no es poden utilitzar normalment en ponts amb traçats en corba.

També cal tenir present que en molts casos, tot i que des del punt de vista de l'estructura del pont pot ser factible fer un reforç provisional, hi pot haver altres condicionants com les dimensions totals del comboi de transport que ens obliguin, de totes maneres, a triar un trajecte sense el pas per un determinat pont.

En la figura 2.31 es mostra un exemple d'un transport especial que, per motius de les grans dimensions del comboi, podria tenir impossible el pas per un pont.



Figura 2.31.- Transport especial

(Font: <https://www.flickr.com/photos/collett-transport/15944644945/>)

Amb les bigues saltadores amb pretensat extradossat s'ampliarien les possibilitats de passar per ponts més llargs que els que es poden reforçar amb els mètodes actuals. Això permetria planificar transports especials de grans dimensions per trajectes amb ponts més llargs i disminuir així temps i costos de transport.

2.4.- Sistemes interessants provinents del reforç permanent de ponts

El reforç permanent de ponts és una tècnica que actualment se sol utilitzar quan necessitem augmentar permanentment la capacitat portant de ponts, ja sigui perquè el pont l'ha perduda per problemes de durabilitat o perquè les sol·licitacions previstes al pont, en termes de sobrecàrregues normals d'ús, superen les sol·licitacions de disseny.

També pot ser que calgui reforçar permanentment un pont per millorar-ne certes característiques, referents als E.L.S. (estats límits de servei), com per exemple el comportament davant de certes accions dinàmiques que provoquen vibracions no contemplades en el moment del disseny del pont. Aquest fenomen es dona més sovint en passarel·les de vianants de grans llums amb estructura metàl·lica i amb sistemes de suspensió.

Tot i això, hi podria haver casos en què, per motius de freqüència esperada de transports especials, pot ser interessant plantejar-se fer un reforç permanent d'un pont. És clar que, en aquest cas, caldria fer un estudi detallat de mercat per saber si seria rendible una inversió d'aquest tipus.

Tret d'aquest aspecte, que va més enllà de les intencions d'aquest treball, pot ser convenient estudiar quin tipus de reforç podríem utilitzar, perquè veurem que, en particular, el pretensat exterior, explicat a continuació, és un sistema molt interessant per reforçar ponts.

El sistema de pretensat exterior ha inspirat l'autor a desenvolupar el nou sistema de reforç provisional de ponts amb bigues saltadores amb pretensat (exterior) extradossat.

2.4.1.- Pretensat exterior

El pretensat exterior consisteix en la instal·lació de tendons metàl·lics (armadura activa) per fora de la secció de l'estructura, sense quedar embeguts en cap altre material com el formigó.

Cal tenir present que, per exemple, en bigues tipus caixó, també podem parlar de formigó pretensat exterior, tot i que, en aquest cas, els tendons queden amagats a la vista, dins de la geometria de la secció.

El pretensat exterior és en realitat un sistema de pretensat amb armadura posttesada, ja que la tensió als tendons s'introdueix amb posterioritat a l'enduriment del formigó o a la confecció de l'estructura amb altres materials.

És un sistema que es pot usar tant per a projectes de noves estructures com per a reforç d'estructures existents. Es pot usar en estructures com ponts, jàsseres o forjats. En la figura 2.32 es mostra un exemple de pretensat exterior, en aquest cas en una biga de formigó tipus caixó, on es marca amb fletxes de color blau l'efecte que

provoca el pretensat sobre l'estructura. En aquest cas s'introdueixen accions verticals en 2 punts de l'estructura, vista en perfil longitudinal.

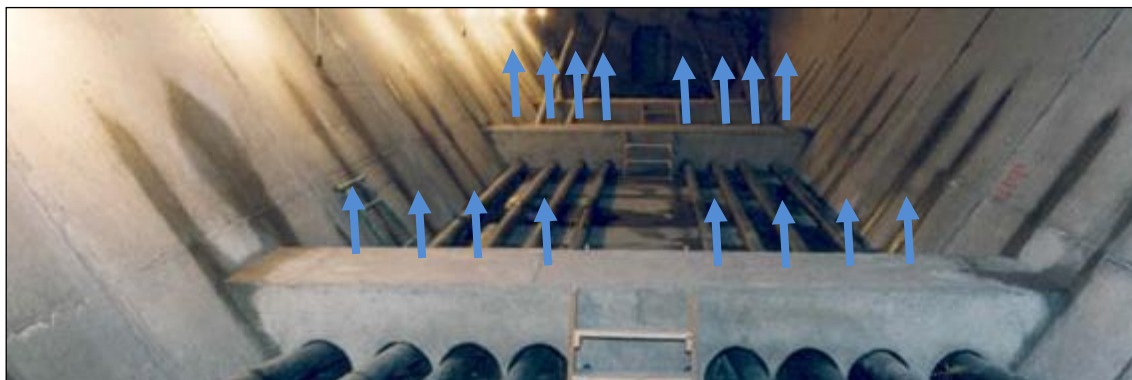


Figura 2.32.- Interior d'una biga tipus caixó, amb pretensat exterior
(Font: https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2016/05/09350001_105_5_1_gro.jpg)

En casos com aquest el pretensat exterior aporta grans avantatges comparat amb el tradicional pretensat embegut en el formigó, com ara eliminar operacions de muntatge i replanteig de ductes (on s'enfilen els tendons d'acer posttensat), disminuir les dimensions de l'ànima de les seccions, i reduir pèrdues per fregament.

En la figura 2.33 es mostra un altre exemple de pretensat exterior. Es tracta del Pont du Truc de la Fare sobre la carretera A75, al municipi francès de Chirac. És un pont on queda clarament reflectida la manera en què el pretensat introdueix accions verticals ascendents a l'estructura, en aquest cas amb 3 punts d'aplicació de la força vertical segons el perfil longitudinal de l'estructura.



Figura 2.33.- Pretensat exterior de disseny (Font: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:A75_-_Passage_sup%C3%A9rieur_du_Truc_de_la_Fare_-1.JPG)

Com queda palès en les figures anteriors, el pretensat exterior introdueix a l'estructura unes accions verticals ascendents.

La idea fonamental amb el pretensat exterior tradicional és contrarestar parcialment l'acció de les càrregues permanents o les sobrecàrregues d'ús; tanmateix, en aquest treball es proposa utilitzar la tècnica de pretensat exterior d'una manera totalment innovadora, que consisteix a dissenyar-lo per contrarestar les sobrecàrregues provisionals produïdes pel pas de combois especialment pesants.

La figura 2.34 mostra un exemple molt típic d'utilització de pretensat exterior com a reforç en un pont. S'observa que, en aquest cas, en cada biga s'hi coloquen dos tendons pretensats que hi actuen mitjançant uns desviadors.



Figura 2.34.- Pretensat exterior de reforç. (Font: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQB-lbqTBWvM7uE8XrKkUW3s95fd_CuLnuxX_jcO9IHhN7qKK6SiQ)

Els desviadors del pretensat exterior acostumen a ser peces metàl·liques on es concentra una acció vertical cap amunt. És habitual pretensar així bigues de ponts, amb 1 o 2 dos suports per cada tendó, depenent de l'efecte estructural desitjat que busquem amb el traçat del pretensat.

En la figura 2.35 es mostra un exemple de desviador del pretensat exterior. En aquest cas es veu que els tendons són de dimensions petites, però que, per contra, se'n necessiten més. Aquesta pot ser una manera d'intentar repartir els esforços en els ancoratges del pretensat als extrems de la biga.



Figura 2.35.- Suport del pretensat. (Font: <https://i.pinimg.com/originals/c4/13/b9/c413b935f5b5fe07eb1d51a80a70d939.jpg>)

Els ancoratges del pretensat als extrems de la biga són uns elements molt importants del pretensat exterior. Normalment es materialitzen amb plaques cargolades o unides a l'estructura, per exemple, amb resines *epoxi*. Això implica fer una certa afectació sobre l'estructura, cosa que cal tenir en compte en el disseny del pretensat.

En la figura 2.36 es mostra un exemple de col·locació de pretensat exterior de reforç d'un forjat. La mateixa tècnica es pot utilitzar per a reforç de ponts. En el vídeo

de l'enllaç, la visualització del qual es recomana, es mostren molt clarament els diferents elements que conformen el sistema, entre altres l'ancoratge del pretensat, els desviadors i el gat hidràulic, de dimensions relativament molt petites.



Figura 2.36.- Anclatge del pretensat i gat hidràulic. (Font, imatge presa del vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=YhQMvDM6QBq>)

Cal anomenar que el traçat del pretensat exterior també pot ser completament recte. En aquest cas no introduïm cap acció vertical a l'estructura sinó que provoquem sobre l'estructura un moment flector negatiu de valor constant que s'oposa, parcialment, al moment flector positiu creat per les càrregues permanents del pont.

En la figura 2.37 es mostra un exemple de disposició del pretensat exterior amb traçat recte, ancorant-lo en una placa metàl·lica fixada a l'ànima de les bigues del pont. En la imatge s'ha marcat, aproximadament, el que podria ser el centre de gravetat de la secció, per mostrar l'excentricitat del pretensat, que és la que indueix el moment flector a l'estructura des de l'ancoratge.



Figura 2.37.- Pretensat exterior de traçat recte. (Font: https://files.structurae.net/files/photos/f001227/dywidaq_stabspannverfahren_ii.jpg)

És important estudiar amb molt detall la resposta tensional de l'estructura allà on apliquem un pretensat exterior, sobretot en les zones dels ancoratges, per tal de saber com afecten a l'estructura els esforços axials que s'hi introdueixen com a reacció del pretensat. En casos on el pretensat no sigui simètric caldria també estudiar l'afectació dels esforços torçors.

En general, es esforços tallants en les zones dels ancoratges no representen cap problema per a l'estructura, ja que són molt menors que els esforços axials, a causa de l'angle, relativament petit, del traçat del pretensat respecte de l'horitzontal i perquè l'estructura ja està ben preparada per a aquest tipus d'esforços.

En la figura 2.38 es mostra un exemple de plaques d'ancoratge i de desviador d'un pretensat exterior. Es marquen en color les accions que el pretensat introdueix a l'estructura: en blau l'acció vertical desitjada i en vermell l'acció no desitjada que cal tenir en compte i controlar.



Figura 2.38.- Plaques d'ancoratge i desviador del pretensat exterior. (Font <http://www.contruaprende.com/images/presentaciones/6/portada-sistema-fricon-reforzamiento-puentes.jpg>)

Com es veurà posteriorment al llarg d'aquest treball, el sistema proposat de bigues saltadores amb pretensat extradossat ofereix una solució que no afecta l'estructura, amb els grans avantatges que això suposa.

Com a informació, cal assenyalar que la tècnica de pretensat exterior amb armadures posttesades s'ha de diferenciar d'un altre tipus de tècnica de pretensat amb armadures posttesades (interiors), que és la normalment coneguda com a *formigó pretensat amb armadures posttesades*.

En aquest cas, els tendons metàl·lics també es tensen posteriorment a la concepció de l'estructura, però queden embeguts en el formigó i es dissenyen seguint trajectòries normalment parabòliques, encara que poden no ser-ho.

La confecció de bigues de formigó pretensat amb armadures posttesades consisteix a confeccionar l'estructura de formigó deixant sense formigonar uns tubs interns (ductes), per on s'introduiran els tendons per ser tensats posteriorment quan el formigó ja té la resistència necessària.

Un cop s'aplica tensió als tendons, l'espai lliure que queda dins els ductes es pot omplir de morter, per fer solidari mecànicament el tendó amb el formigó (pretensat adherent), o bé de greix (pretensat no adherent). Aquest últim cas és l'habitual si es preveu retensar o canviar els tendons durant la vida útil de l'estructura.

En la figura 2.39 es mostra un exemple de biga preparada amb les armadures passives i amb els ductes per a les armadures posttesades, abans de ser encofrada i formigonada.



Figura 2.39.- Biga amb armadures passives i armadures actives posttesades. (Font: https://www.360enconcreto.com/Portals/5/Comunidad360%5D/imagen1-abc-concreto-preesforzado_1.jpg)

La tècnica de pretensat exterior ha estat una font d'inspiració per a l'autor d'aquest treball a l'hora de concebre un sistema de reforç provisional a base de pretensat exterior muntat en el sistema de bigues saltadores.

2.4.2.- Altes sistemes de reforç permanent

1) Fibres de carboni

Un dels sistemes més habituals per a reforç permanent d'estructures és el reforç amb fibres de carboni. És molt eficaç tant des del punt de vista mecànic com de la posada en obra, ja que el material utilitzat té una gran resistència, de l'ordre de 15-30 vegades superior a la de l'acer, i ocupa molt poc espai.

En la figura 2.40 es mostren exemples de reforços amb fibres de carboni: en (a) es mostra un reforç per a esforços tallants, en (b) un reforç per a moments flectors i en (c) un reforç per als esforços axials. Estructuralment el gran avantatge d'aquest sistema de reforç és que les fibres de carboni no provoquen cap acció sobre l'estructura, sinó que simplement n'augmenten la capacitat portant.

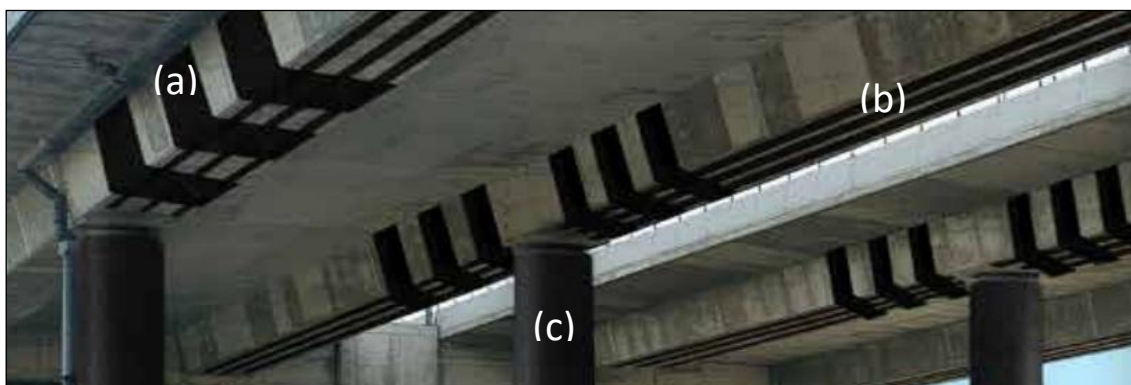


Figura 2.40.- Reforços amb fibra de carboni. (Font: https://www.sp-reinforcement.es/sites/default/files/field_literature_file/brochura_frp_es_0.pdf)

Les fibres de carboni ofereixen una durabilitat excel·lent. Un altre gran avantatge d'aquest mètode de reforç és que la posada en obra és molt senzilla, ja que consisteix en l'aplicació d'alguna capa adherent sobre l'estructura a reforçar, normalment resines *epoxi*, on posteriorment s'enganxa la fibra de carboni.

En funció del material i de l'estructura a reforçar podríem triar les fibres de carboni en diferents formats, com ara làmines, teixit, barres o fibres allargades. Per a reforç de ponts s'utilitzen normalment làmines i també materials en forma de teixits.

En la figura 2.41 es mostra un exemple de col·locació de fibres de carboni sota el taulell d'un pont, per augmentar-ne la capacitat portant respecte dels moments flectors. S'observa la lleugeresa del material i la facilitat de col·locació.



Figura 2.41.- Col·locació de fibres de carboni en format de teixit. (Font: <https://encrypted-bn0.gstatic.co/images?q=tbn:ANd9GcTLVOZJx1hqw8-tl9DUR6cqq6nPTNs-WqrRLtUCIvDkyaRiycqX0q>)

El reforç amb fibres de carboni també es pot dur a terme amb làmines pretensades. És una tècnica usada normalment en jàsseres de forjats, però també es podria fer servir en ponts.

La figura 2.42 mostra un exemple de làmines de fibra de carboni pretensades i també els gats de tensat, de dimensions molt reduïdes. La tensió s'introdueix a les làmines abans d'enganxar-les a l'estructura a reforçar, i quan el sistema s'ha assecat es retira el gat de tensat.



Figura 2.42.- Làmines de fibra de carboni pretensades. (Font: https://www.sp-reinforcement.es/sites/default/files/field_product_image_list/prestress.jpg)

Les fibres de carboni tenen un gran èxit com a sistema de reforç permanent d'estructures, i podrien tenir també un cert camp d'aplicació per a reforços provisionals en casos molt concrets on calgués tan sols reforçar una petita zona puntual d'un pont i on, al mateix temps, no es poguessin fer servir altres mètodes com els apuntalaments o les bigues saltadores.

En la figura 2.43 es mostra un exemple d'utilització d'un vehicle especial per a treballs sota el taulell de ponts. És un sistema molt útil per a inspeccions i també per a la col·locació de reforços puntuals i lleugers, com podrien ser els de fibres de carboni.



Figura 2.43.- Vehicle especial per a treball sota taulell de ponts.
(Font: imatge del vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=EnS8zGR1LYU>)

En altres casos, sobretot per a actuacions molt puntuals, en zones poc accessibles i tenint en compte el poc pes dels materials per fer el reforç, es podria optar per tècniques de treballs verticals.

Aquestes tècniques, iniciades als anys 80, actualment estan molt esteses dins del món de la construcció. Són tècniques utilitzades en feines d'inspecció, de manteniment i de muntatge, per exemple, en grans ponts atirantats o ponts penjats, i també en molts altres ambients amb accés difícil.

En la figura 2.44 es mostra un exemple de treball sota un taulell de pont amb tècniques de treballs verticals, una tècnica coneguda internacionalment com a *rope access*.



Figura 2.44.- Treball amb tècniques de rope access. (Font: <http://www.emaengineers.com/wp-content/uploads/2017/08/1cb4ef4d9410a354a0f15aca0c2ecdca.jpg>)

2) Recreixement de seccions

El reforç de seccions mitjançant el recreixement de la secció, ja sigui amb formigó armat o amb plaques metàl·liques, és també un sistema que, tradicionalment, s'ha utilitzat molt per reforçar estructures. Actualment, però, aquest sistema està quedant una mica en desús davant la implementació al mercat de sistemes com l'explicat en l'apartat anterior, de fibres de carboni.

Els avantatges d'aquest sistema és que el reforç queda completament integrat a l'estructura, sobretot si es fa amb formigó armat. Això és positiu tant des del punt de vista estructural com d'estètica de l'estructura.

Els inconvenients d'aquest sistema són, entre d'altres, el pes del material, comparat amb les fibres de carboni, que pot requerir l'ús de grues o plataformes per col·locar-lo, així com encofrats per recreixement amb formigó armat.

El possible interès d'aquest sistema per als reforços provisionals és bàsicament utilitzar plaques metàl·liques, com el reforç mostrat en la figura 2.45, per subjectar-hi l'ancoratge d'un pretensat exterior.



Figura 2.45.- Reforç amb plaques metàl·liques. (Font: https://www.sp-reinforcement.es/sites/default/files/field_project_col_image_img/6_6.jpg)

Aquest sistema de reforç permanent, i en particular el recreixement de seccions amb plaques metàl·liques, tot i ser tecnològicament possible d'usar en moltes estructures, seria poc convenient per reforçar un pont davant el pas d'una única càrrega excepcional.

És, però, un sistema que ha servit d'inspiració a l'autor d'aquest treball per desenvolupar la idea d'un mètode per instal·lar un pretensat exterior sense els inconvenients de muntatge que presenta aquest tipus de reforç.

Veurem en el capítol següent que amb el sistema proposat de bigues saltadores amb pretensat extradossat ens estalviem qualsevol afectació de l'estructura.

CAPÍTOL 3:

NOU SISTEMA DE REFORÇ PROVISIONAL DE PONTS

3.1.- INTRODUCCIÓ

Pel que s'ha plantejat fins aquí es dedueix que amb les tècniques actuals de reforç provisional de ponts podem resoldre molts casos, però no tots, i encara menys en un temps i uns costos raonables.

Per intentar trobar solucions per ampliar les possibilitats de reforçar ponts el primer que podem fer és analitzar si amb els materials i tècniques que s'utilitzen en l'actualitat es podria dissenyar algun altre sistema de reforç més polivalent.

En aquest capítol es presenten un seguit d'idees innovadores que, de manera separada o de manera conjunta, amplien les possibilitats de reforçar ponts de manera provisional. El capítol conclou amb la proposta final de bigues saltadores amb pretensat extradossat, que seria la opció de reforç provisional més polivalent de totes.

3.2.- BIGUES SALTADORES RECOLZADES AL MIG DEL PONT

Un dels fonaments del present treball es basa en la utilització de les bigues saltadores tradicionals d'una manera poc convencional. Això seria útil per als casos on la llargada de les bigues saltadores de què disposem és insuficient per al pont a travessar.

En la figura 3.1 es mostra un esquema de la nova proposta, on triem bigues d'una llargada igual a la meitat de la llum del pont per recolzar al mig del pont.

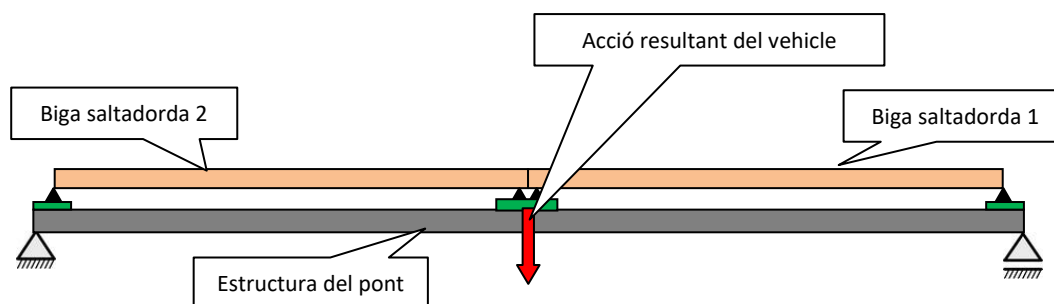


Figura 3.1.- Esquema de col·locació de les bigues saltadores. (Font: elaboració pròpia)

Amb això aconseguim transformar la càrrega distribuïda que produeix el transport pesant en una càrrega puntual, des del punt de vista estructural.

Aquesta càrrega puntual, tot i que provoca uns moments flectors (M^+) similars als que produeix la càrrega distribuïda (depenent si la càrrega distribuïda ocupa o no tota l'estructura), serà molt més fàcil de contrarestar amb algun dels sistemes que es plantegen en aquest treball, per exemple un pretensat exterior.

En la figura 3.2 es mostra l'efecte que provoca carregar l'estructura a través de dues bigues saltadores, que es recolzen als extrems i al mig de l'estructura. Per simplificació en l'exposició es mostra aquest efecte en una biga isostàtica i considerant una càrrega distribuïda sobre tota l'estructura, que és el cas més desfavorable. Els valors numèrics absoluts són irrellevants en aquest exemple.

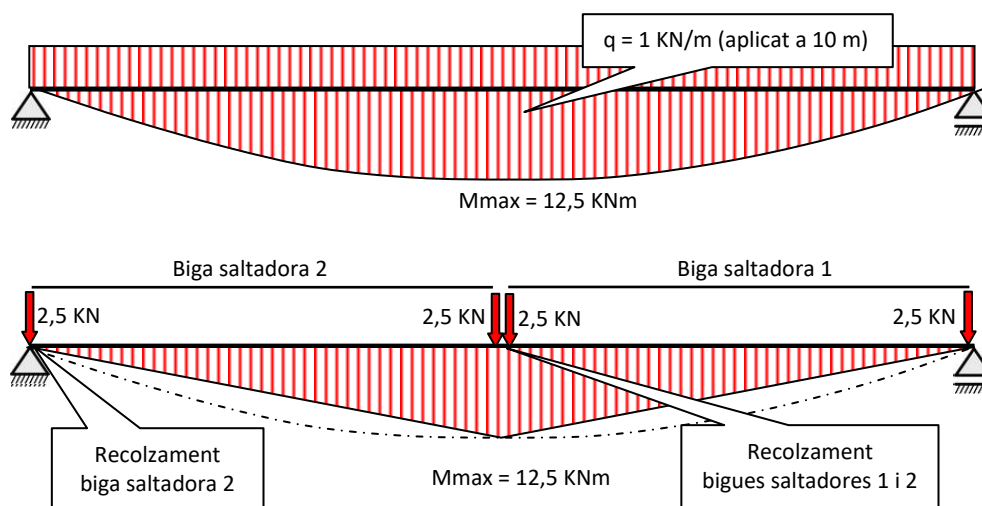


Figura 3.2.- Transformació la llei de M^+ de parabòlica a puntual.

L'exemple mostra els resultats per a una biga de 10m i $q = 1 \text{ kN/m}$. Els valors numèrics són només un exemple, però mostren l'efecte explicat.

La figura anterior mostra el cas més desfavorable quant a M^+ , amb la càrrega (vehicle) ocupant tot el taulell del pont, però l'efecte és el mateix si la càrrega està centrada però sense ocupar tota la llum. En els altres casos, quan la càrrega està començant a circular pel pont, l'efecte és similar al descrit anteriorment.

La figura 3.3 mostra com serien els moments flectors en el cas de carregar la meitat de la llum, i la transformació dels flectors carregant el pont pel mig de la llum a través de les bigues saltadores.

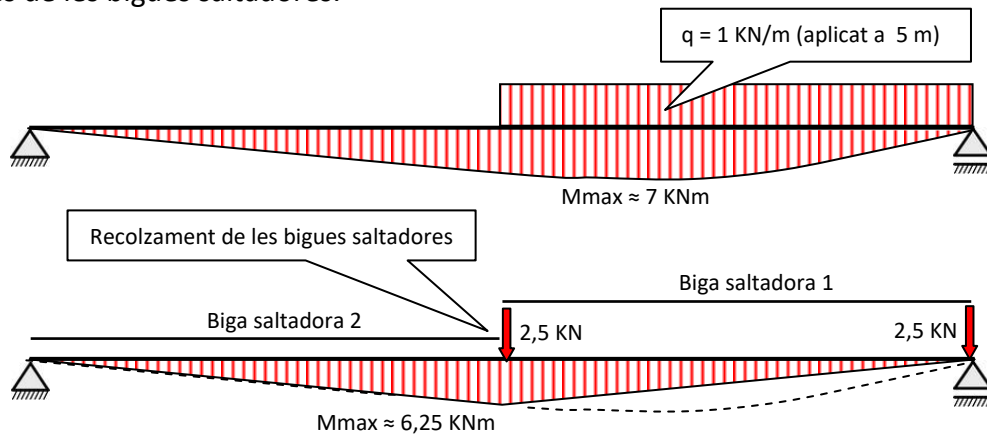


Figura 3.3.- Transformació de la llei de M^+ amb càrrega puntual.

Com es veu en els exemples anteriors, la llei de M^+ en el cas de recolzar les bigues saltadores al mig de la llum és sempre triangular, i canvia de valor a mesura que la càrrega circula pel pont. En ponts de fins a 3 vegades la longitud de les bigues saltadores (estàriem parlant de fins $3 \times 25 \text{ m}$), podríem plantejar un sistema similar, esquematitzat en la figura 3.4.

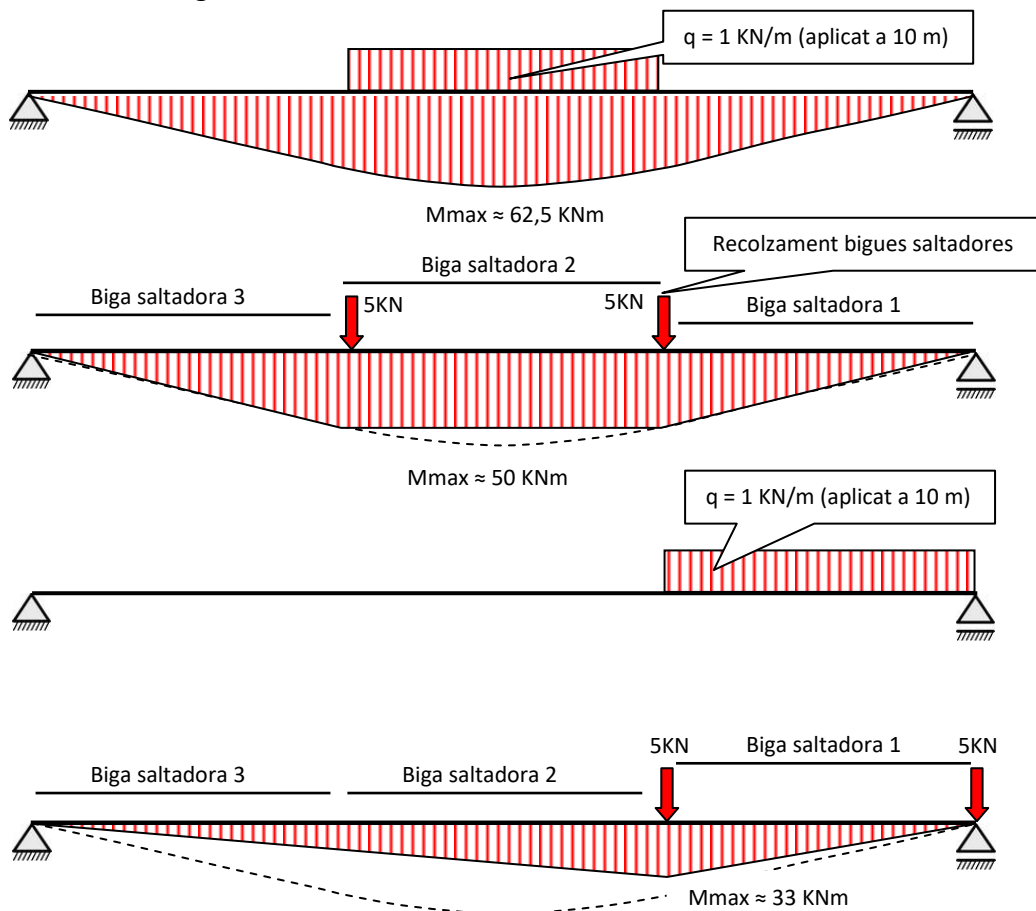


Figura 3.4.- Efecte sobre M^+ aplicant la càrrega a través de 3 bigues saltadores.

Com queda reflectit en els exemples anteriors, col·locar bigues saltadores recolzades al mig del pont transformaria la llei de moments flectors de formes parabòliques a formes triangulars. Amb això aconseguim reduir la dificultat del problema estructural, ja que intentar contrarestar una càrrega puntual és molt més senzill que intentar contrarestar una càrrega distribuïda.

Amb aquesta idea podríem apropar-nos a una solució en ponts de llargada fins al doble de la llargada de les bigues saltadores. El que cal és trobar un sistema per contrarestar la càrrega puntual.

3.2.1.- Combinació amb cindri al mig del pont

Seguint amb la idea de recolzar les bigues saltadores al mig de la llum del pont (o en el seu cas, per a ponts molt llargs, en diversos punts), un possible sistema per contrarestar la càrrega puntual provinent dels recolzaments de les bigues saltadores podria ser l'ús de cindris o estructures inferiors, sota el taulell del pont, col·locats just asota d'on es recolzen les bigues saltadores.

Es tractaria d'usar estructures molt resistents, com les que s'utilitzen per a la construcció de ponts. D'aquesta manera crearíem una mena de pila provisional del pont, com es mostra en la figura 3.5.

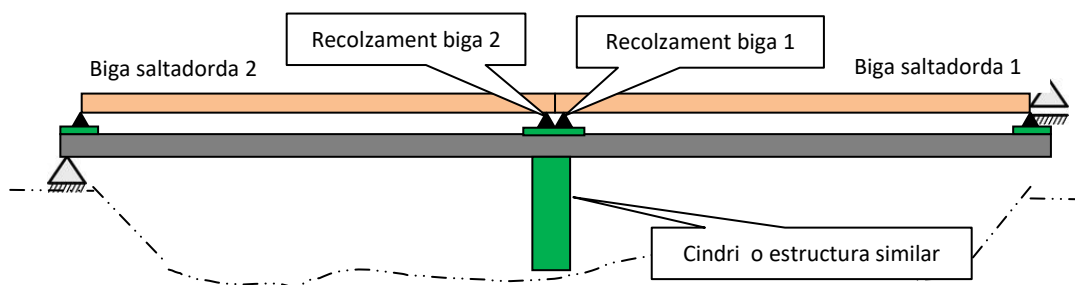


Figura 3.5.- Col·locació d'estructura portant al centre de la llum.

Suposant que aquest sistema fos factible a la pràctica, és a dir, que disposem del material necessari, que les condicions de llum sota el pont i del terreny són apropiades, que tenim el temps necessari i que l'economia del projecte ho permet, aquest sistema seria òptim per a l'estructura del pont, ja que no se sol·licitaria longitudinalment ni abans, ni durant, ni després del pas del vehicle.

A nivell estructural, l'únic element del pont que suportaria càrrega durant el pas del vehicle per les bigues saltadores seria el cindri o estructura inferior. Caldria, però, fer comprovacions a nivell de les seccions en les zones sol·licitades entre els recolzaments de les bigues i el punt de recolzament de l'estructura inferior i, si fos necessari, es podria ampliar la superfície de contacte amb el pont, tant del recolzament de les bigues com del cindri, per evitar problemes tensionals.

En aquest cas, l'estructura resistent sota el taulell del pont hauria de tenir la rigidesa suficient, per poder considerar-la, un recolzament deformable, o en tot cas caldria tenir un control suficientment detallat de la seva deformació. En aquest segon

cas, el taulell del pont, conjuntament amb l'estructura inferior, actuarien com un recolzament tipus molla, davant l'acció de les bigues saltadores recolzades al mig del taulell.

Un avantatge d'aquest sistema combinant bigues saltadores i cindris és que l'estructura del pont no rep cap sol·licitació abans del pas del vehicle, la qual cosa evita accions desfavorables cap amunt, cosa que sí que passaria amb un sistema de pretensat exterior. Amb aquesta simplificació estructural del problema es podrien reforçar ponts de llums molt grans, o ponts de longitud total molt gran.

En la figura 3.6 es mostra un exemple d'utilització combinada de bigues saltadores i de cindris. S'observa la simplicitat de l'esquema estructural i els avantatges que podria tenir comparant-ho amb un reforç del mateix pont només amb cindris, que haurien d'ocupar pràcticament tota la superfície sota el pont.

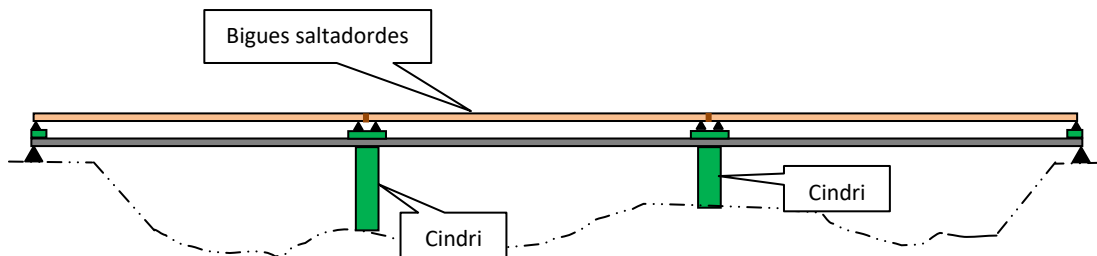


Figura 3.6.- Estructures resistents just sota el recolzament de les bigues saltadores.

Cal recordar que utilitzar un suport inferior sense les bigues saltadores recolzades al mig de la llum és un sistema inadequat des del punt de vista estructural, perquè es crearien uns moments negatius importants, ja que el taulell del pont passaria a treballar estructuralment com una biga contínua (veure figura 2.25 c).

La imatge 3.7 mostra un exemple on, tot i l'exposat anteriorment, els càlculs estructurals demostren que no danyem l'estructura; per tant, el reforç es pot fer d'aquesta manera.



Figura 3.7.- Cindris al centre de la llum. (Font: http://www.dacoheavylift.com/wp-content/uploads/2019/09/K1600_IMG_1930.jpg)

3.2.2.- Combinació amb pretensat exterior al mig del pont

En el punt anterior queden exposats els avantatges de col·locar les bigues saltadores recolzades al mig del pont. Tanmateix, per ampliar el camp de la possible aplicació d'aquesta pràctica, caldria utilitzar un sistema que no depengui ni de l'altura lliure sota el pont ni de l'accessibilitat.

Com que les bigues saltadores, col·locades d'aquesta manera, exerceixen una càrrega puntual descendent al mig del taulell del pont, seria òptim trobar un sistema que exerceixi justament una càrrega contrària a aquesta, és a dir, una càrrega puntual ascendent al mig de la llum del pont.

Com hem vist en apartats anteriors, i en particular en l'apartat 2.4 ("Sistemes interessants provinents del reforç permanent de ponts") amb el pretensat exterior podem aconseguir just aquest efecte d'introduir a l'estructura del pont una (o en el seu cas, més d'una) acció vertical puntual ascendent.

En la figura 3.8 es mostra un esquema de col·locació de bigues saltadores recolzades al centre de la llum en combinació amb un pretensat exterior acoblat a l'estructura del pont. Es marca amb vermell la sol·licitació, en forma de càrrega puntual, que arriba al pont deguda a la càrrega circulant per les bigues saltadores.

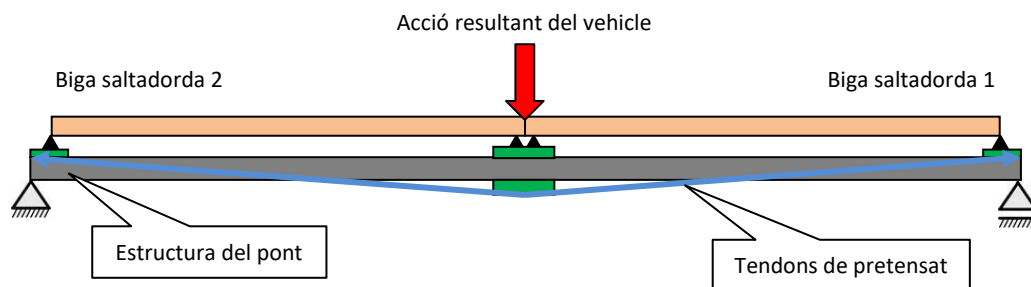


Figura 3.8.- Bigues saltadores i pretensat exterior.

3.3.- PRETENSAT VARIABLE

Situats en el context d'utilitzar un pretensat exterior per contrarestar l'acció que arriba al pont a través de les bigues saltadores recolzades al centre de la llum del pont, s'observa la necessitat de plantejar el pretensat exterior amb una velocitat d'aplicació variable.

El pretensat variable és un sistema que ara per ara no s'utilitza però que, en realitat, és molt semblant al pretensat exterior. Es tractaria d'utilitzar el mateix tipus d'equipament que cal per al pretensat exterior, però tensant i destensant els tendons subjectes als gats hidràulics, sense tallar-los ni ancorar-los com faríem amb el pretensat i posttensat exterior habitual.

En el cas d'un pretensat exterior com el que es planteja en aquest treball, les dimensions del gat podrien ser significativament menors, la qual cosa permetria una posada en obra relativament senzilla.

En la figura 3.8 es mostra un exemple de gat hidràulic per a pretensat. En aquest cas, les dimensions de l'equipament són relativament grans, ja que es tracta del pretensat com a disseny constructiu d'un pont.



Figura 3.8.- Gat hidràulic per a pretensat. (Font: <http://www.precomprimidos.com.co/portals/0/Servicios/PosttesadoInd.jpg>)

Aquesta idea innovadora de plantejar un pretensat de força variable és deguda a la inconveniència d'introduir la màxima força de pretensat necessària abans que la sobrecàrrega extraordinària circuli pel pont.

Això és així perquè, amb el pretensat necessari per contrarestar aquestes càrregues tan elevades (de centenars de tones), s'introduirien molt probablement a l'estructura accions per a les quals no està dissenyat, bàsicament moments flectors negatius molt superiors als de disseny, sobretot en ponts de bigues isostàtiques com els que tractem en aquest treball.

Aquesta idea de variar la força del pretensat, que és prou intuïtiva per si mateixa, està més àmpliament justificada en l'annex 1 ("Relació entre el pas del vehicle pesant i la força de pretensat variable") on, a través d'un exemple concret, obtenim un gràfic que relaciona els metres que avança el comboi sobre el pont i la força de pretensat necessària que cal aplicar. Això ens serviria de guia per plantejar un pretensat variable en un cas real.

Per la gran variació de casos que podem trobar, amb diferents llums, diferents longituds i càrrega de cada comboi, queda fora de l'objectiu d'aquest treball acadèmic trobar una relació més universal entre el pas del vehicle i la càrrega que arriba al centre de la llum del pont. La metodologia a seguir queda recollida en l'annex 1.

En la figura 3.9 es mostra, de manera molt simplificada, com augmenta progressivament la sol·licitació al centre de la llum del pont, en avançar la càrrega pel pont. De la mateixa manera, i de forma coordinada, hauria de variar la força de pretensat que aplicariem al sistema estructural.

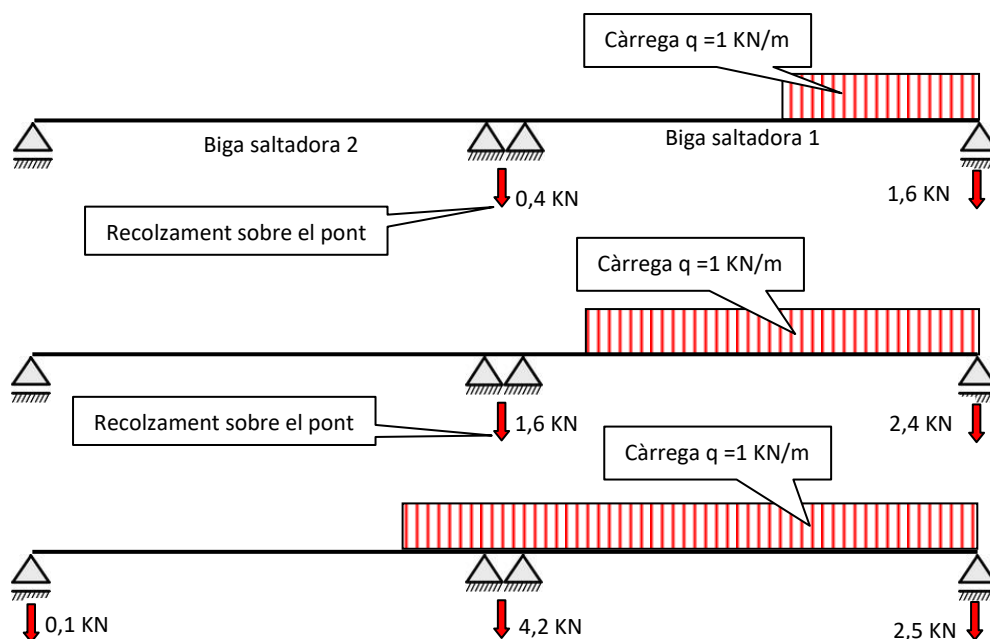


Figura 3.9.- Variació de la càrrega que arriba al centre de la llum.

A la pràctica, per poder coordinar l'aplicació de la força del pretensat amb l'acció que crea el vehicle sobre el pont, seria molt útil fer un muntatge amb sensors de càrrega.

La figura 3.10 mostra una possible col·locació dels sensors de càrrega on, en aquest cas, el vehicle començaria a circular per la biga saltadora 1 (de dreta a esquerra en la imatge).

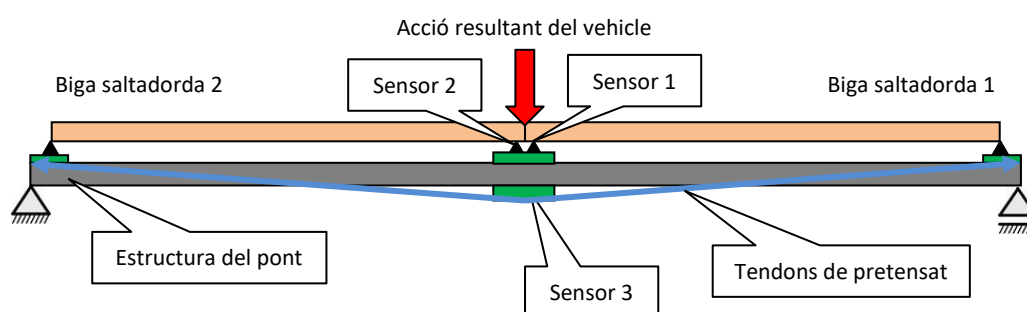


Figura 3.10.- Col·locació de sensors de càrrega. (Font: elaboració pròpia).

En l'esquema anterior, el "sensor 1" mesura la força que la biga saltadora 1 realment exerceix sobre el pont. El "sensor 2" mesura, així mateix, la força que la biga saltadora 2 fa realment sobre el pont. Seguidament se sumen els valors dels sensors 1 i 2, que és l'acció real que el vehicle exerceix sobre el recolzament de les bigues saltadores al centre del pont.

A continuació s'envia aquesta informació al sistema de pretensat, perquè, tenint en compte la geometria particular de cada cas, produeixi una força vertical total d'igual magnitud però de sentit contrari.

Així, el dispositiu "sensor 3" comprova a temps real que efectivament la força de pretensat esperada realment (amb certs marges d'error admissible) s'està aplicant, i si és així, es continua el pas del vehicle.

En la figura 3.11 es mostra el possible flux d'informació entre els sensors, el qual es podria fer de manera directa electrònicament, o a través de lectures manuals. Aquests sensors podrien gestionar, regular i controlar la força de pretensat a aplicar.

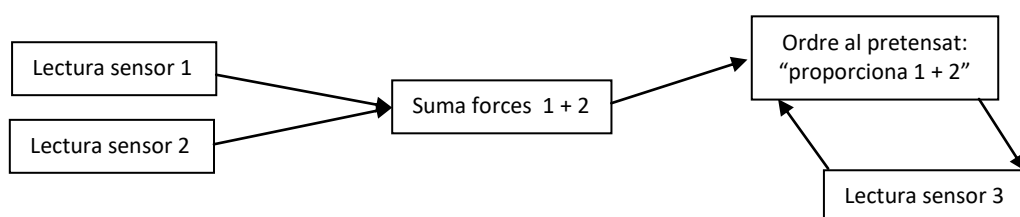


Figura 3.11.- Esquema de flux d'informació i d'ordres en el sistema de sensors.

Els dispositius de suma de forces de les bigues saltadores 1 i 2 podrien ser tant electrònics com manuals, i el mateix amb les ordres d'aplicar la força de pretensat, que podrien donar-se automàticament de forma electrònica o de forma manual.

La força aproximada amb què caldria tensar els tendons de pretensat (P) seria senzilla de calcular amb un traçat del pretensat de forma triangular. En aquest cas prescindim de l'estudi de possibles pèrdues de la força del pretensat, ja que l'objectiu final és obtenir una força total de pretensat vertical (F) que es mesuraria amb el sensor de càrrega situat sota els recolzaments centrals de les bigues saltadores al mig de la llum del pont.

El pretensat triangular és molt senzill de fer, comparat amb un pretensat parabòlic, i ens dona precisament una resultant vertical al mig de la llum del pont que s'oposa a l'acció produïda pels recolzaments de les bigues saltadores.

La figura 3.12 mostra l'esquema de forces del pretensat triangular.

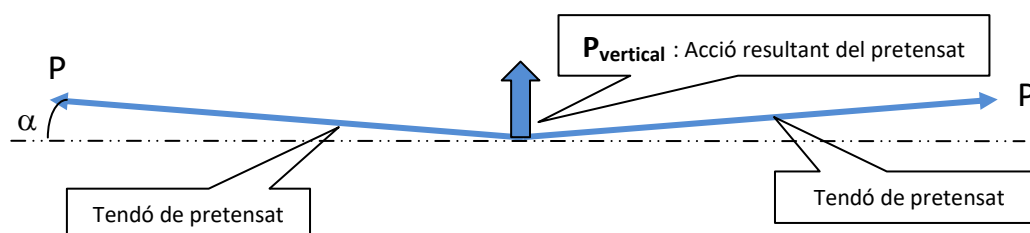


Figura 3.12.- Esquema de forces del pretensat triangular.

La formulació per calcular la força vertical a aplicar l'obtenim fàcilment analitzant l'equilibri de forces:

$$P_{\text{vertical}} = 2.P. \sin\alpha$$

P_{vertical} : força vertical resultant

P: força amb què es tensa el tendó

α : Angle d'inclinació del traçat de pretensat

Aquesta força de pretensat necessària la podríem preveure i controlar mitjançant un estudi previ que faríem en cada cas concret. En l'annex 1 ("Relació entre el pas del vehicle pesant i la força de pretensat variable") es mostra amb un exemple com es podria fer aquesta anàlisi.

Pel que s'ha presentat fins ara, podríem afirmar que un pretensat exterior variable muntat en l'estructura del pont podria, teòricament, utilitzar-se per contrarestar les càrregues extraordinàries produïdes pel pas d'un vehicle molt pesant sobre un pont, quan circuli sobre bigues saltadores recolzades al mig de la llum del pont.

Tanmateix, ens trobaríem amb dificultats que podrien ser insalvables, a un cost i a un temps raonables, per poder dur a terme aquest sistema a la pràctica: la instal·lació de tot l'equipament ancorat a l'estructura del pont i el desmuntatge posterior.

Per això s'ha desenvolupat la idea de dissenyar un nou sistema amb el pretensat variable per sobre del pont. Els avantatges que presenta respecte d'un pretensat acoblat a l'estructura del pont són evidents, entre d'altres:

- Desapareix la necessitat de conèixer amb gran detall com està dissenyada l'estructura, ja que no necessitem muntar en el pont cap placa d'ancoratge ni separador del pretensat, amb l'estalvi de temps i de mitjans que això representa.
- Cap afectació de l'altura lliure sota el pont, amb els avantatges que això suposa, per exemple, si per sota el pont hi circula trànsit viari, ferroviari o marítim, si el pont està en zona urbana, o si el pont està sobre un riu.
- El muntatge de tot el sistema de pretensat, i en particular el dels gats de pretensat, es podria fer des de la calçada, amb la comoditat que això comporta.
- El control del procés de tensat i destensat es podria fer fàcilment, ja que tots els equipaments són accessibles durant tota la maniobra, sense plataformes de treball per accedir als costats i a la part inferior del pont.
- Ens estalviem tots els processos que caldrien per retirar tot l'equipament acoblat al pont, com els separadors i els ancoratges del pretensat.

CAPÍTOL 4:

BIGUES SALTADORES AMB PRETENSAT EXTRADOSSAT

4.1.- INTRODUCCIÓ

Un cop analitzades les bases teòriques d'aquest nou sistema de reforç, és a dir: la utilitat de recolzar les bigues saltadores al mig de la llum del pont i la necessitat de muntar un pretensat variable que no afecti l'estructura del pont, exposem els arguments detallats per poder desenvolupar el nou sistema de reforç provisional de ponts mitjançant bigues saltadores amb pretensat extradossat.

En la figura 4.1 es mostra un esquema longitudinal del sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat. Com es veu en la imatge, el sistema de pretensat està acoblat a les bigues saltadores i no al pont (com ho estava en la figura 3.10), amb els grans avantatges que això comporta, ja mencionats anteriorment, de facilitat de muntatge i no afectació a l'estructura del pont.

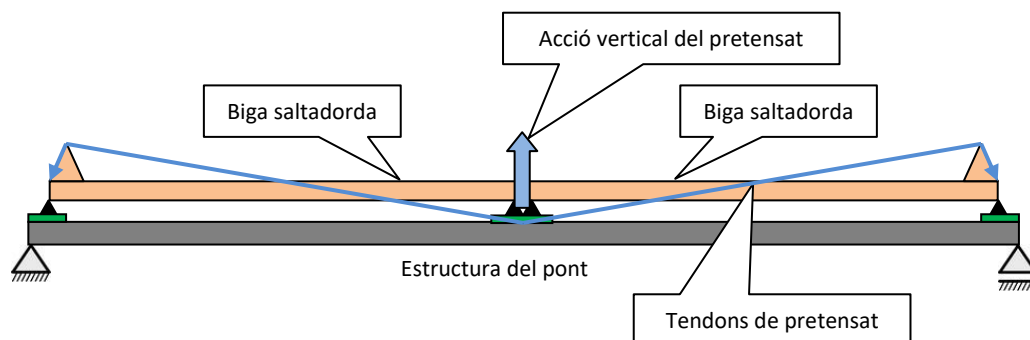


Figura 4.1.- Bigues saltadores amb pretensat extradossat. (Font: elaboració pròpia)

4.2.- CONSIDERACIONS ESTRUCTURALS DEL SISTEMA PROPOSAT

Com s'ha comentat anteriorment, es proposa incorporar un sistema de pretensat triangular, de força variable, a les bigues saltadores, per ampliar fins al doble de longitud el seu camp d'aplicació.

En aquest apartat farem un seguit de consideracions estructurals per mostrar la viabilitat del sistema proposat de bigues saltadores amb pretensat extradossat.

Primerament, cal recordar que una possible utilització de sensors de càrrega, com els descrits en l'apartat 3.3 (figura 3.10 i figura 3.11), podria ser de gran utilitat també en aquest sistema estructural amb el pretensat situat sobre el pont. En aquest cas, però, caldria remarcar la importància de col·locar el "sensor 3" just sota el recolzament central de les bigues saltadores i no sota el taulell del pont.

En la figura 4.2 es mostra l'esquema de la disposició dels elements en aquest sistema estructural i s'observa que, a diferència del tradicional pretensat exterior de reforç de ponts, el pretensat en aquest cas no afecta l'estructura del pont, sinó que està situat per sobre. Com s'ha comentat anteriorment, si s'utilitza un sensor de càrrega (sensor 3) caldria col·locar-lo just sota el recolzament central.

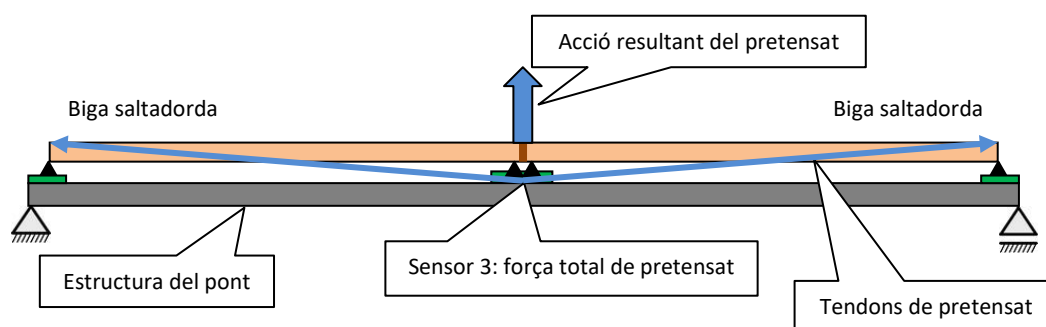


Figura 4.2.- Esquema de bigues saltadores amb pretensat exterior i col·locació d'un sensor de càrrega. (Font: elaboració pròpia)

Cal dir que tot aquest raonament s'ha fet en la secció longitudinal de l'estructura, és a dir, tenint en compte el total de les càrregues i de les forces aplicades en cada secció transversal. Per tant, la instal·lació d'aquest sistema caldria fer-la tenint en compte la meitat d'esforços per cada banda del pont (vist transversalment).

Tot i així, veurem que es tracta de forces de pretensat molt grans, primerament perquè els vehicles especials poden tenir un pes de centenars de tones, però sobretot també perquè el traçat dels tendons de pretensat seria pràcticament horitzontal, amb molt poca inclinació, ja que les bigues saltadores tenen un cantell molt reduït.

Estem parlant de bigues saltadores de fins a uns 25m de llarg amb cantell als extrems d'uns 0,5m (per accedir a les bigues calen unes rampes), cosa que ofereix molt poc pendent al traçat dels tendons.

En la figura 4.3 es mostren les dimensions proporcionals d'una biga saltadora i s'observa la poca inclinació dels tendons de pretensat si es col·loquessin així, cosa que faria poc efectiu estructuralment el sistema de pretensat.

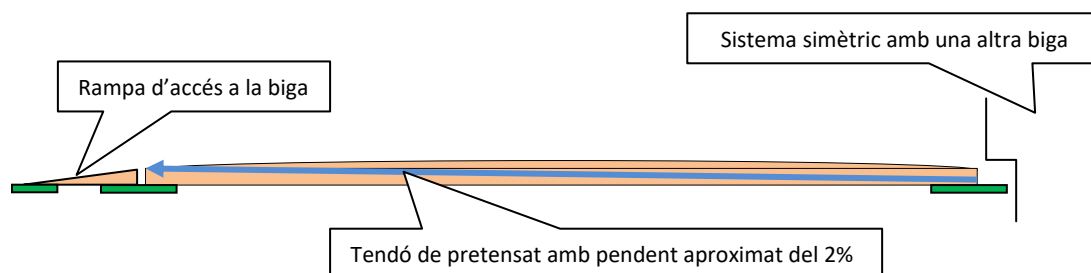


Figura 4.3.- Mides proporcionals aproximades d'una biga saltadora de 25 m. (Font: elaboració pròpia)

Aquest pendent tan reduït del traçat del pretensat ens portarà al següent pas, que és pensar un sistema que ofereixi més inclinació al traçat del pretensat triangular.

La idea és necessitar una força de pretensat menor per obtenir el mateix efecte d'acció vertical i poder fer servir tendons de pretensat més petits, més fàcils de muntar i de tensar. Això ho podem fer augmentant l'excentricitat del traçat del pretensat.

La possible solució tecnològica per a aquesta necessitat d'augmentar l'excentricitat pot ser semblant i inspirada en la tècnica de pretensat extradossat.

En la figura 4.4 es mostra un exemple típic de pretensat extradossat, ja introduït en el capítol 1. Es tracta del pont sobre el riu Deba, a Guipúscoa. En aquest cas es fa èmfasi en l'ancoratge dels tendons de pretensat a l'extrem de la biga i es marca de color negre la força resultant del pretensat sobre l'estructura.



Figura 4.4.- Pont amb pretensat extradossat. (Font: <http://www.jallombart.com/wp-content/uploads/2017/08/386.jpg>)

En el nostre cas, no podem aconseguir exactament el mateix efecte que en el cas de pretensat extradossat, com el de la figura anterior, on la continuïtat del pretensat equilibra i anul·la els moments flectors sobre el pilar del pont, però sí que podem ancorar el pretensat d'alguna manera prou idònia.

En la figura 4.5 es mostra un possible sistema per augmentar l'excentricitat del pretensat elevat el punt d'ancoratge del pretensat en el seu extrem (passant de α a β en la figura).

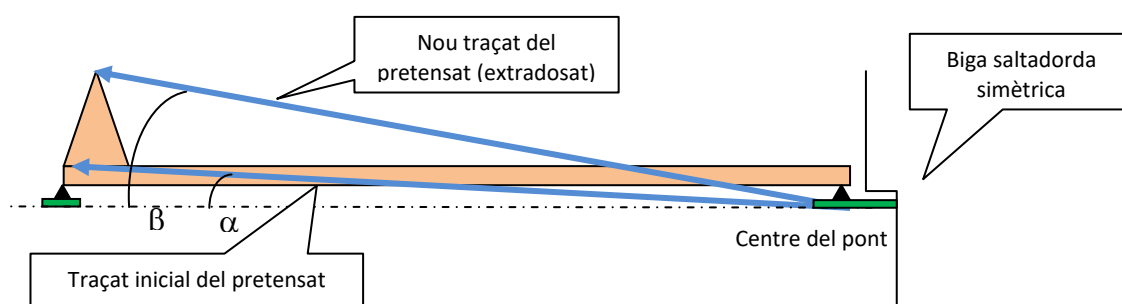


Figura 4.5.- Biga saltadora amb pretensat extradossat. (Font: elaboració pròpia)

La disposició del pretensat mostrada en la imatge anterior ja ofereix una inclinació considerable (que estudiarem amb més detall a continuació), però amb el pretensat ancorat a la part superior de l'ancoratge introduiríem a les bigues saltadores uns moments flectors desfavorables.

Per això, cal pensar una altra disposició dels tendons en l'ancoratge que sigui més neutral estructuralment en relació a les bigues saltadores. L'objectiu és aconseguir un equilibri de les forces de pretensat en l'ancoratge que no perjudiqui estructuralment el sistema de bigues saltadores.

En la figura 4.6 es mostra una possible disposició del pretensat en l'ancoratge, fixant els tendons en la mateixa biga saltadora (o una estructura auxiliar) a través d'una "peça d'extradosat". Es marca en negre l'acció del pretensat sobre la biga saltadora. Perquè es vegi ben clar en la figura, les dimensions no són proporcionals.

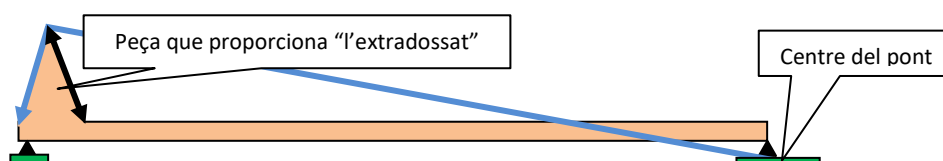


Figura 4.6.- Ancoratge del pretensat en la "peça d'extradosat". (Font: elaboració pròpia).

Amb aquesta disposició del pretensat, la reacció del pretensat sobre la biga saltadora queda reduïda a una força puntual que crea un M^+ en la biga saltadora molt petit.

Un aspecte important que cal destacar del sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat és la necessitat d'absorbir els esforços horitzontals que es produeixen en els ancoratges del pretensat als extrems de la biga.

Estudiar aquest aspecte estructural sobrepassa les intencions d'aquest treball acadèmic, però podem intuir que aquests esforços horitzontals produïrien efectes molt

negatius sobre les bigues saltadores, perquè es veurien sol·licitades a grans esforços combinats de flexió i compressió.

Per a això, probablement caldria utilitzar una estructura auxiliar col·locada en els extrems de les bigues saltadores, la qual tindria exclusivament la funció de transmetre aquests esforços horitzontals fins al recolzament central, on s'autoequilibrarien.

Un altre detall molt important d'aquest sistema de pretensat és l'ancoratge central sota els recolzaments de les bigues saltadores (al mig de la llum del pont). La idea aquí és també evitar flexionar les bigues saltadores i simplement crear l'efecte d'intentar elevar el recolzament de les bigues amb el pretensat.

En realitat es tracta de reduir la càrrega que arriba al taulell del pont a través del suport de les bigues al mig del pont. Per aconseguir-ho cal ancorar el pretensat a una peça separada de les bigues.

En la figura 4.7 es mostra, de manera esquematitzada però prou detallada, la disposició del pretensat en el suport central de les bigues saltadores, acoblat a la peça de recolzament central i no a les pròpies bigues saltadores.

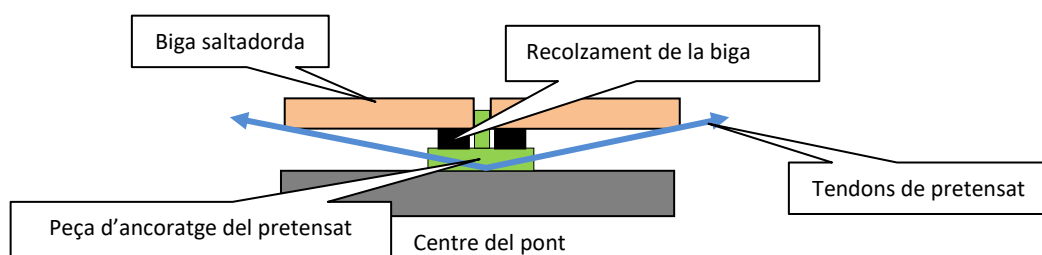


Figura 4.7.- Suport central de les bigues saltadores. (Font: elaboració pròpia).

La forma, les dimensions, la resistència i sobretot la rigidesa de la peça d'ancoratge central del pretensat ha de ser tal que n'impedeixi el desplaçament tant vertical com horitzontal, i que permeti la transmissió d'esforços del pretensat a les bigues saltadores en tota l'amplada del pont. Caldria fer un dimensionament molt acurat d'aquesta peça central de recolzament (i ancoratge central de pretensat), deixant un gran marge de seguretat, ja que és una part vital d'aquest sistema de pretensat.

Per tal de poder desenvolupar una força de pretensat variable, com hem vist que caldria, podem pensar diverses possibilitats: variar la longitud dels tendons, variar-ne la inclinació o variar les dues coses.

Es podria variar la longitud dels tendons usant un gat hidràulic. Per facilitar-ne el muntatge, tot i que el sistema no fos exactament simètric, podríem optar inicialment per muntar el tensor només en les bigues saltadores d'un costat del pont, perquè en aquest sistema amb pretensat variable les pèrdues de força de pretensat són irrelevantes, ja que podem anar variant la tensió dels cables.

En la figura 4.8 es mostra una possible col·locació del gat hidràulic per variar la força del pretensat.

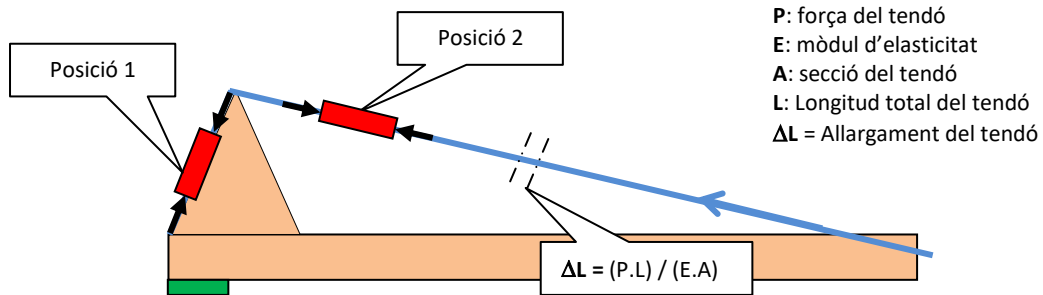


Figura 4.8.- Co·locació del gat hidràulic. (Font: elaboració pròpia).

La figura 4.9 mostra una possible col·locació del gat hidràulic per variar, bàsicament, l'excentricitat del traçat. La posició idònia del gat hidràulic seria aquella en què l'angle del gat respecte del tendó sigui molt similar a banda i banda del gat, per evitar moments flectors en el gat, però que al mateix temps es minimitzin els moments flectors en la biga.

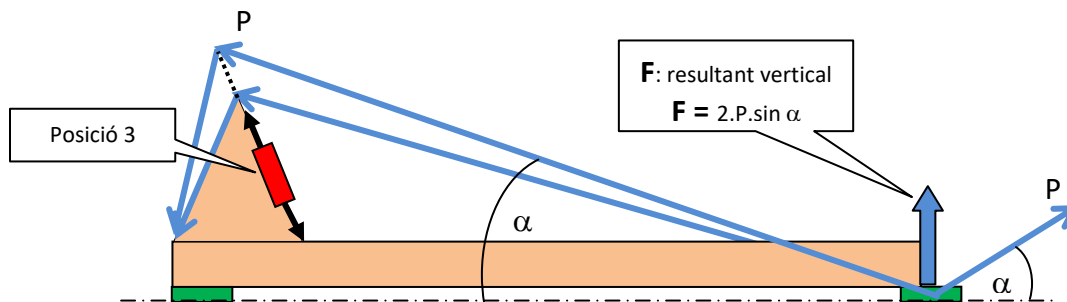


Figura 4.9.- Co·locació del gat hidràulic. (Font: elaboració pròpia).

Aquesta última col·locació del gat hidràulic (posició 3), que permet variar l'excentricitat del pretensat, pot ser especialment útil en casos on necessitem fer un muntatge de 3 bigues saltadores consecutives.

D'aquesta manera podríem actuar independentment sobre les excentricitats dels tendons a banda i banda del pont, la qual cosa ens permetria variar les forces de pretensat en cada recolzament de les bigues saltadores sobre el pont.

En la figura 4.10 es mostra un esquema d'un sistema longitudinal de 3 bigues saltadores. S'indica de manera simplificada com podríem ajustar la inclinació del traçat del pretensat per contrarestar la càrrega que arriba al pont a través dels recolzaments de les bigues saltadores (A i B en la figura).

En vermell es mostren les accions produïdes pel pas de la càrrega, i en blau, les forces que produeix el pretensat.

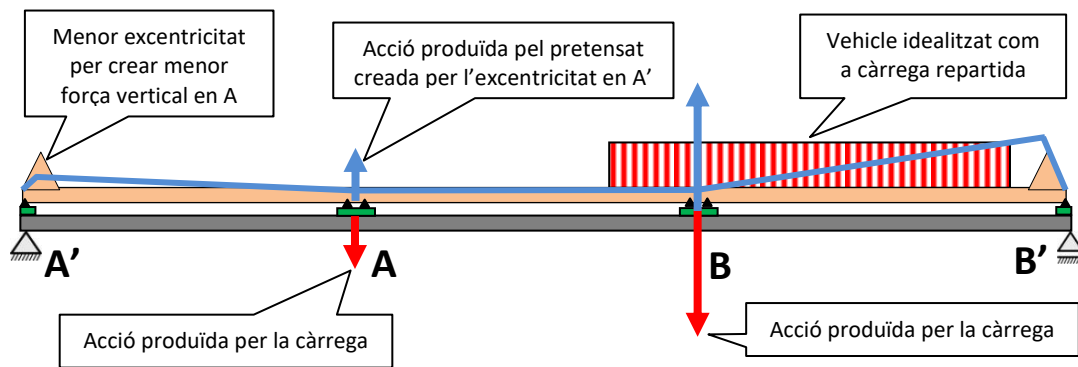


Figura 4.10.- Esquema longitudinal de reforç amb 3 bigues saltadores amb pretensat extradossat.
(Font: elaboració pròpia)

La relativa simplicitat d'aquest sistema es basa en què les bigues saltadores treballen com una estructura de bigues isostàtiques, la qual cosa comporta que aquestes només produeixen accions verticals sobre el taulell del pont.

L'equilibri mecànic en les peces del recolzament de les bigues saltadores (les que transmeten l'acció vertical del pretensat) és ara una mica diferent que en els casos anteriors, ja que la força vertical produïda pel pretensat té una component horitzontal i es veu afectada només per "P", i no per "2P" com en el cas anterior (veure figura 3.12).

En la figura 4.11 es mostra un esquema de forces del traçat del pretensat en el pas per les peces de recolzament de les bigues saltadores. Aquí fem la simplificació que la tensió del tendó és igual en tot el seu trajecte, cosa que no seria del tot certa, a causa del fregament en aquesta zona.

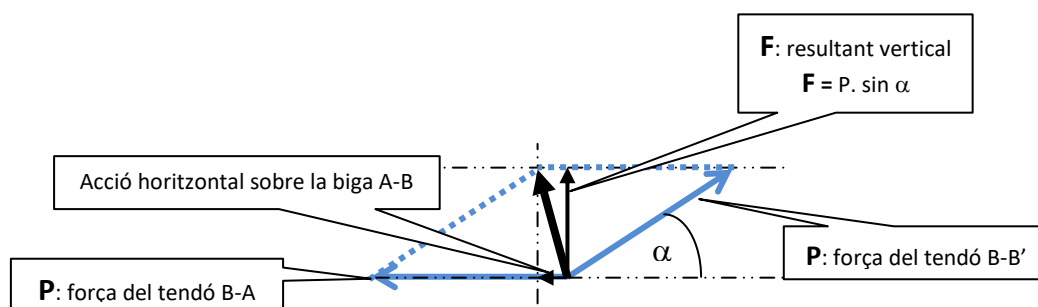


Figura 4.11.- Equilibri de forces degudes al pretensat, en la peça de suport "B" de la imatge 4.10

L'estudi detallat d'aquest cas sobrepassa les intencions d'aquest treball, però podríem veure que, teòricament, podem aportar forces de pretensat contràries i proporcionals a les forces produïdes pels suports de les bigues saltadores sobre el pont.

Això ampliaria teòricament encara més el camp d'aplicació del sistema de reforç provisional amb bigues saltadores amb pretensat extradossat, que podria passar a ser de 75m de llarg. En realitat, però, els ponts tan llargs probablement no necessiten reforç perquè les càrregues de disseny ja són prou elevades.

4.3.- PREDIMENSIONAMENT DEL PRETENSAT

En aquest apartat valorarem, aproximadament, en quin rang de forces i dimensions ens movem per fer unes primeres valoracions sobre la possible viabilitat d'aquest sistema.

Per aconseguir-ho, farem les consideracions (hipòtesis) sobre els equipaments, el material i la geometria del sistema de pretensat. Amb negreta marquem els valors per als càlculs:

1) Equipaments i material

- Capacitat gat **$P_g \approx 1.000$ tones (10.000 kN)**
- Amplitud del moviment **$\Delta L_{gat} \approx 300$ mm**
(capacitat raonable d'aquests equipaments, segons consulta)
- Mòdul de deformació longitudinal dels tendons: **$E = 190$ kN/mm²**
- Tensió de ruptura (valor característic) acer: $f_{pk} = 1.900$ N/mm²
- Tensió de treball (deformació lineal): $0,7 \cdot f_{pk} = f_{pt} = 1.330$ N/mm²
- Coeficient parcial de seguretat acer d'armadura activa $\gamma_s = 1,15$
- Tensió preliminar de càlcul: $f_{pt} / \gamma_s = f_{pd} = 1.156$ N/mm²

Aquests tendons treballaran de manera molt diferent que els tendons de pretensat i posttensat tradicional, ja que aquests tindran molts cicles de càrrega-descàrrega durant l'ús i durant la seva vida útil (seria similar a un cert efecte de fatiga), cosa que caldria estudiar en detall.

Per aconseguir-ho, caldria una fabricació industrial específica per a aquest tipus de tendó, i controlar-ne de manera exhaustiva tant la qualitat com la durabilitat.

Per això augmentem encara més el coeficient de seguretat. Per arrodonir i simplificar, podem considerar:

- Tensió de càlcul **$f_{pd} = 1.000$ N/mm²**
- Diàmetre màxim de tendons: **$\phi \approx 10$ cm** (àrea ≈ 7.800 mm²)

2) Geometria del sistema de bigues i pretensat

En la figura 4.12 es mostra un possible dimensionament aproximat del sistema de pretensat en les bigues saltadores.

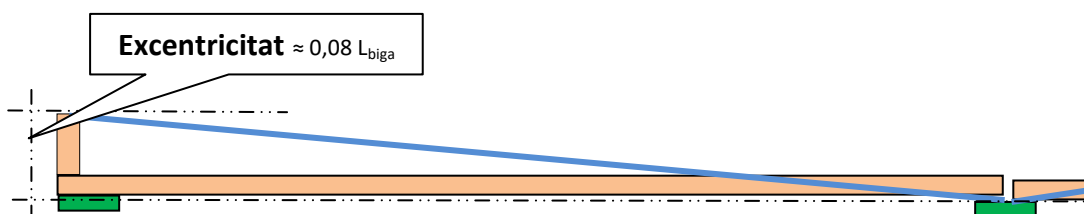


Figura 4.12.- Dimensions proporcionals del sistema de pretensat. (Font: elaboració pròpia)

Si considerem raonable en el context una “peça d’extradossat” d’uns 1,5m d’alçada, i un cantell de la biga, en els extrems, de 0,5m, tenim una excentricitat total respecte del punt d’ancoratge sota la biga, en la peça de recolzament, d’uns 2m.

Això, per a una biga saltadora de 25m (que seria el cas amb menor excentricitat) representaria un angle d’inclinació del pretensat de: $\alpha \approx \arctg (2/ 25) \approx 4,5^\circ$.

- $\alpha \approx 4,5^\circ$ (inclinació del 8%, ens servirà per al predimensionament)
- Longitud biga: $L_{biga} = 25m$
- Longitud tendó: $L_{tendó} \approx 50m$

3) Càrrega al centre del pont

Podem fer consideracions inicials per veure l’ordre de magnitud de la sol·licitació màxima del vehicle sobre el pont, a través de les bigues saltadores.

En la figura 4.13 es mostra un esquema simplificat de com podem idealitzar la càrrega del vehicle com a càrrega distribuïda uniforme. En aquest cas, per una càrrega de longitud total, la meitat de la llum.

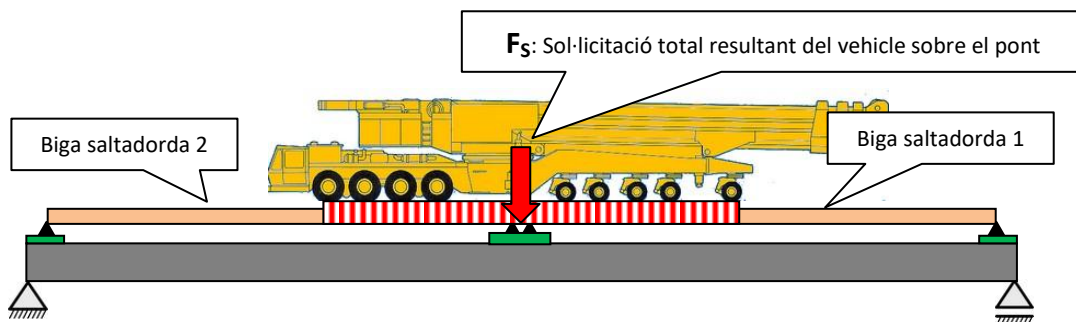


Figura 4.13- Càrrega en la posició més desfavorable pel pont de biga isostàtica.
(Font: elaboració pròpia).

Podem fer un exemple com aquest:

- Longitud total del pont $L_{pont} = 50m$
- Pes total comboi de càrrega $P_{comboi} = 700 \text{ tones}$ (càrrega relativament molt gran)
- Longitud comboi $L_c = 25m$ (relativament curta per a una càrrega tan elevada)
- Pes del comboi per metre lineal: $P_{cm} = 700/25 = 28 \text{ Tn/m}$
Càrrega distribuïda: $q_{comboi} = 280 \text{ KN/m}$
- Longitud biga saltadora: $L_b = 25m$

Farem el càlcul de les reaccions de les bigues saltadores en el centre del pont per a cada cas en particular, ja que les variables longitud del pont, longitud del comboi, i càrrega que representa el comboi, hi tindran influència.

En la figura 4.14 es mostra aquest càlcul per al cas concret que la càrrega distribuïda tingui la longitud igual a la meitat que la llum del pont.

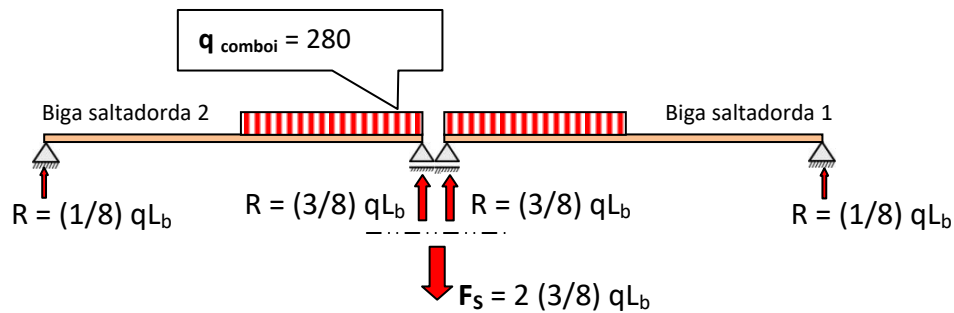


Figura 4.14.- Càlcul de les reaccions amb càrrega distribuïda.

En ser un cas simètric, la reacció total al centre de llum serà la suma de les reaccions al centre del pont:

$$F_s = 2 (3/8) qL_b$$

$F_s = 5.250 \text{ KN}$ (càrrega puntual deguda al pes del vehicle)

Aquesta acció, si es tractés d'un vehicle que circula a velocitats "normals", l'hauríem d'incrementar amb un valor de $\gamma_f = 1,35$, coeficient parcial per a les accions de la sobrecàrrega d'ús. En el nostre cas, però, és preceptiu que el vehicle circuli molt lentament, per evitar efectes dinàmics i la sobrecàrrega que això podria representar. Tot i així, aplicarem un cert increment d'aquest valor per seguretat.

- Utilitzarem, per exemple, $\gamma_f = 1,05$ (increment del 5%)

Tindrem, així, que $F_{\text{total vehicle}} \approx 5.600 \text{ KN}$

Cal tenir present que aquesta serà la sol·licitació [KN] total sobre el pont. Com que s'aplicarà en tota l'amplada del pont, la càrrega que arribarà a cada recolzament dels extrems (esquerra i dret vist en sentit de circulació), que és on muntarem el sistema de pretensat, serà la meitat d'aquest valor. Això ho tindrem en compte posteriorment quan dimensionem el nostre sistema de pretensat.

Cal tenir present que la peça de recolzament central de les bigues saltadores ha de tenir la rigidesa suficient per transmetre aquests esforços. Això es comenta amb més detall en el següent apartat.

Per tant, la càrrega que es transmet via els recolzaments de les bigues saltadores contra el pont, a banda i banda vist en amplada, tindrà un valor de l'ordre de magnitud (en aquest cas concret) de:

$$F = F_{\text{total vehicle}}/2 \approx 5.600/2 \text{ KN} \rightarrow F \approx 2.800 \text{ KN}$$

En la figura 4.15 es mostra com, a través del recolzament de les bigues saltadores al centre de la llum del pont, es transmeten les càrregues provinents del vehicle pesant a l'estructura del pont.

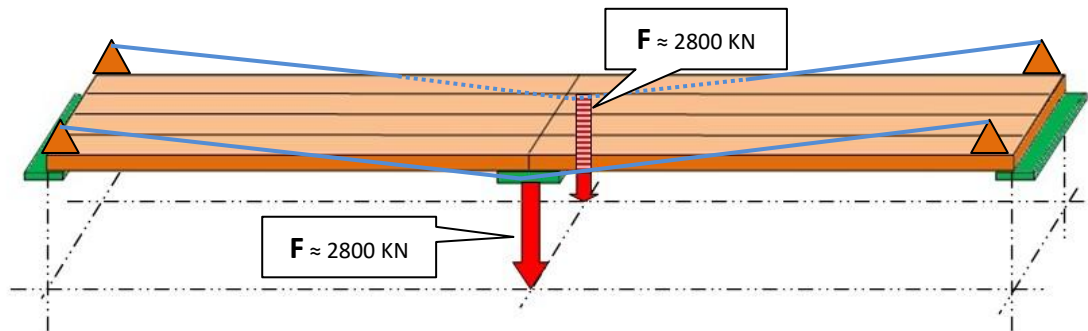


Figura 4.15.- Transmissió de la càrrega al taulell del pont. (Font: elaboració pròpia)

Els valors de F són orientatius i estan presos d'aquest exemple en concret, en què només estudiem l'ordre de magnitud de les forces en un cas relativament desfavorable pel pont.

En els punts següents veurem que no hem de dissenyar el pretensat perquè pugui contraposar-se a aquests valors, sinó que els hi haurem de restar la capacitat portant de disseny que ja té el pont.

4) Resistència del pont a càrregues d'ús de disseny

Seguint els passos indicats en l'apartat 2.2.1 ("Capacitat portant dels ponts"), i considerant per exemple que tenim un pont de 50m de llum i 6m d'amplada (2 carrils de 3 m), tindríem les següents sobrecàrregues d'ús totals de disseny, mostrades en la figura 4.16.

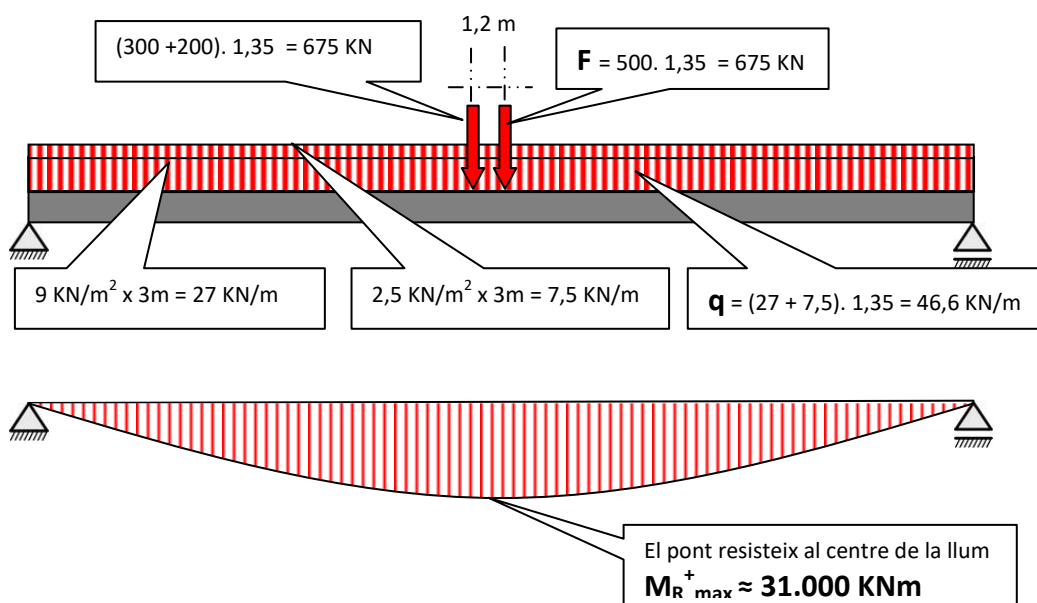


Figura 4.16.- Tren de càrregues de disseny i la llei de moments flectors.

Amb uns càlculs molt senzills, podem trobar la càrrega total puntual “equivalent” que produeix el mateix $M_{R\max}^+$ que el tren de càrregues de disseny.

Ho calculem amb l’expressió:

$$F_{\text{equivalent R}} = (4 \cdot M_{R\max}^+) / L$$

$$F_{\text{equivalent R}} \approx (4 \cdot 2500) / 50 \approx 2.500 \text{ KN}$$

En la figura 4.17 esquematitzem l’acció puntual que exerceix el mateix flector que la càrrega distribuïda.

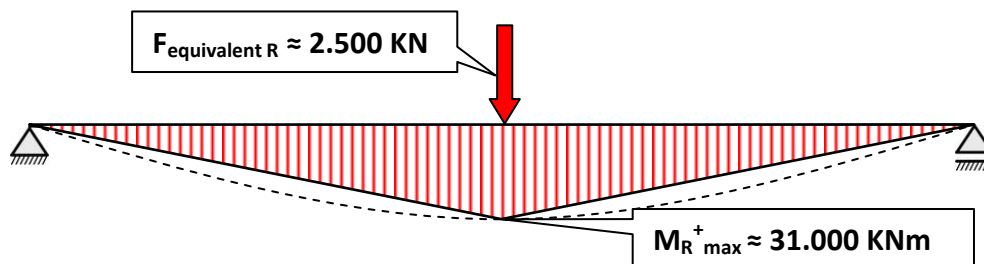


Figura 4.17.- Càrrega puntual “equivalent” que produeix el mateix $M_{R\max}^+$ que en el cas anterior.

Això no vol dir que el pont resistís aquesta càrrega puntual (tindria problemes de tensions concentrades i de deformació excessiva), però aquest raonament és útil per valorar quina força de pretensat vertical cal aplicar per tal de no sobrecarregar el pont.

$F_{\text{equivalent R}} \approx 2.500 \text{ KN}$ (resistència “teòrica” del pont a una càrrega puntual)

$F_{\text{total vehicle}} \approx 5.600 \text{ KN}$ (actuant el seu pes a través de les bigues saltadores)

En aquest exemple, veiem que el pont no resistiria el pas del vehicle pesant col·locant les bigues saltadores recolzades al mig del pont sense pretensat; per tant, estudiarem si el predimensionament del pretensat és raonable.

Cal dir que el primer càlcul de tots hauria de ser el que ens permetés veure si l’acció del vehicle (sense bigues saltadores) és suportada pel pont. En aquest cas es veuria que el pont no la suporta.

5) Força que ha de proporcionar el pretensat

La força total vertical que ha de produir el pretensat ($P_{\text{vertical total}}$) serà la necessària perquè el pont treballi dins del seu límit portant:

$$F_{\text{equivalent R}} \approx 2.500 \text{ KN}$$

$$F_{\text{total vehicle}} \approx 5.600 \text{ KN}$$

$$P_{\text{vertical total}} \approx 5.600 - 2.500 \approx 3.100 \text{ KN}$$

Com ja hem comentat anteriorment, aquesta és la força total que ha de produir el pretensat. Per tant, com que tenim un muntatge de pretensat a banda i banda de les bigues de pretensat (dreta i esquerra en sentit de circulació), cada tendó ens ha de proporcionar la meitat d'aquest valor.

Per tant tenim:

$$P_{\text{vertical tendó}} \approx 3.100 / 2 \approx 1.550 \text{ KN}$$

En la figura 4.18 esquematizem el traçat del pretensat amb les forces que cal considerar.

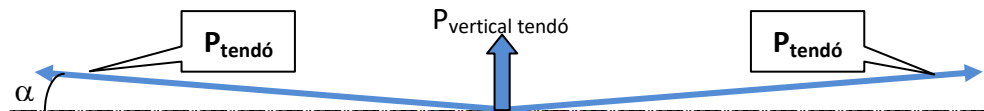


Figura 4.18.- Esquema de forces en el pretensat triangular.

De les consideracions dels punts anteriors, tenim:

$$\alpha \approx 4,5^\circ$$

$$P_{\text{vertical tendó}} = 1.550 \text{ KN}$$

$$P_{\text{vertical tendó}} = 2 \cdot P_{\text{tendó}} \cdot \sin \alpha$$

$$P_{\text{tendó}} \approx 1.550 / (2 \sin(4,5)) \text{ [KN]} \rightarrow P_{\text{tendó}} \approx 9.900 \text{ KN}$$

A comparar amb la capacitat suposada del gat $P_g \approx 10.000 \text{ KN}$ (1.000 tones)

Amb aquest resultat, podem interpretar, de moment, que les dimensions dels equipaments i del pretensat de les bigues saltadores sembla que tinguin valors raonables. En els punts següents continuarem amb les comprovacions.

6) Comprovació a nivell d'esforços: moments flectors

Resumint el fet fins ara, comparem aquí els esforços que suporta el pont amb els que produeix el vehicle (actuant sobre les bigues saltadores) i els que provoca el pretensat, que disminueixen la càrrega que es transmet al pont.

Amb aquests valors aproximats (ara només estudiem els ordres de magnitud), observem que efectivament el pretensat dissenyat proporciona els M^- que calen perquè el pont treballi dins del rang de disseny:

M_{max}^+ deguts a la càrrega del vehicle $\approx 70.000 \text{ KNm}$

M_{max}^+ : la resistència del pont $\approx 31.000 \text{ KNm}$

M^+ que el pont no resisteix $\approx 70.000 - 31.000 \approx 39.000 \text{ KNm}$

M_{max}^- que proporciona el pretensat $\approx 38.750 \text{ KNm}$ ($\approx 39.000 \text{ KNm}$)

En la figura 4.19 mostrem les lleis de moments flectors. En (a) es mostra l'envolvent de la llei de flectors produïda pel pas de vehicle. En (b) es mostra el moment flector que resisteix el pont. En (c) es mostra el flector negatiu màxim que pot proporcionar el pretensat, que, com es pot veure, és d'igual magnitud que el moment degut al pas del vehicle que el pont no pot suportar.

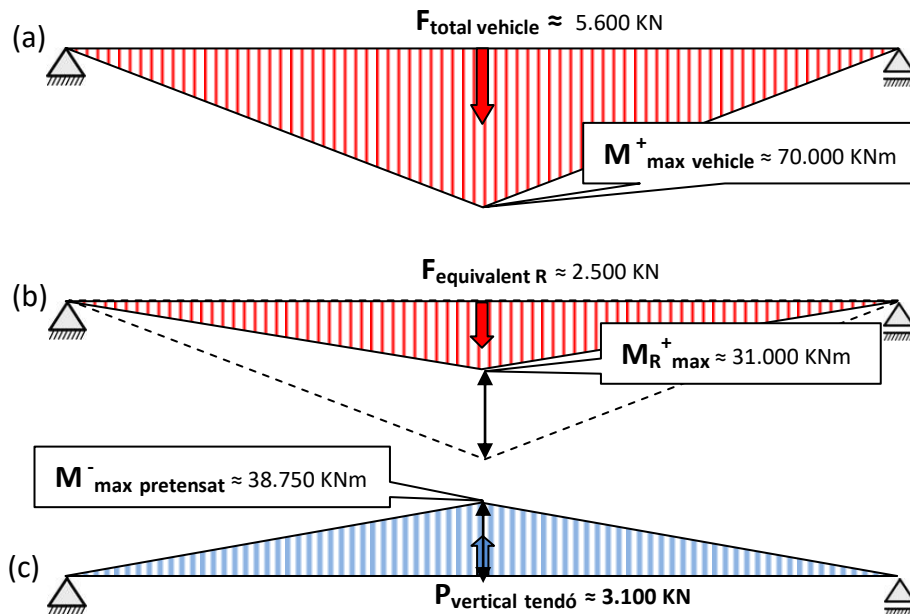


Figura 4.19.- Comprovació a nivell d'esforços flectors (M).

Queda palès que el sistema de pretensat, amb les premisses fetes fins ara, que són, bàsicament: un sistema amb dos tendons, a banda i banda del sistema de bigues saltadores, i amb un pendent del traçat del tendons amb un angle $\alpha \approx 4,5^\circ$, podria proporcionar la força total necessària.

7) Altres comprovacions

Comprovem quin seria l'allargament del tendó:

$$\Delta L_{\text{tendó}} = (P_{\text{tendó}} L_{\text{tendó}}) / EA$$

Amb els valors que hem considerat fins ara, tenim:

$$\Delta L_{\text{tendó}} = (9.900 \text{ kN} \times 50.000 \text{ mm}) / (190 \text{ kN/mm}^2 \times 7.800 \text{ mm}^2)$$

$$\Delta L_{\text{tendó}} \approx 335 \text{ mm}$$

A comparar amb la ΔL_{gat} de 300 mm que ens podia proporcionar el pistó.


Queda palès, en aquest cas que ha servit d'exemple, que ens movem dins d'un rang de dimensions raonable, cosa que no seria així si resultés un allargament de l'ordre de metres, per exemple.

Si el pistó tingués massa poca amplitud de moviment es podrien valorar opcions com: augmentar l'àrea dels tendons de pretensat, o bé col·locar dos pistons, un a cada extrem del tendó.

Fins aquí hem pogut comprovar amb un exemple, dels que més capacitat del pretensat podria requerir degut a l'elevat pes del convoi i degut a les desfavorables dimensions del pont (de llum gran i amplada petita) que el predimensionament que hem fet del pretensat, en relació al seu traçat i a la força vertical que pot proporcionar dona uns valors raonables.

Sintetitzant les hipòtesis considerades i els resultats obtinguts, tenim que:

- $P_{\text{comboi}} = 700$ tones (càrrega relativament molt gran)
- Longitud comboi $L_c = 25$ m (relativament curta per a una càrrega tan elevada)
- Càrrega distribuïda: $q_{\text{comboi}} = 280$ KN/m

Llum	Bigues	Esquema càrrega	$P_{\text{tendó}}$	$\Delta L_{\text{tendó}}$
50 m	2x25 m		9.900 KN	335 mm

Si fem el mateix desenvolupament amb la mateixa càrrega i les mateixes dimensions proporcionals de la biga saltadora, però passant per ponts de diferents longituds, mantenint l'exemple d'amplada de 6 m, obtindríem també resultats que demostren la viabilitat d'aquest sistema estructural.

Per a ponts amb amplades més habituals, que són normalment molt superiors als 6m considerats en l'exemple, obtindríem uns valors encara menors de força de pretensat i d'allargament del tendó. Això és perquè, com hem vist en punts anteriors, els ponts més amples estan dissenyats per suportar càrregues majors.

Aquests resultats mostren que el sistema de bigues amb pretensat extradossat té unes dimensions geomètriques i una capacitat mecànica molt raonables en aquest context, la qual cosa en prova la viabilitat.

4.4.- EVOLUCIÓ DEL SISTEMA PROPOSAT

Per les característiques acadèmiques d'aquest treball, amb un temps i uns recursos limitats, el present estudi no arriba al nivell de detall necessari per poder desenvolupar tecnològicament aquestes bigues saltadores amb pretensat extradossat però en deixa exposades les bases teòriques i les consideracions estructurals prèvies que cal fer.

Els següents punts es consideren d'especial interès davant un possible desenvolupament més detallat de les idees plantejades en aquest treball:

- Cal fer un estudi detallat de mercat per veure la viabilitat econòmica del sistema proposat, analitzant la necessitat real que hi ha en el sector de transports especials, tant a nivell nacional com internacional.
- Cal conèixer amb exactitud les característiques tècniques de les bigues saltadores que s'utilitzen en l'actualitat. En especial cal estudiar les dimensions, i la capacitat mecànica de totes les peces que componen el sistema de bigues saltadores, com les rampes d'accès i les pròpies bigues.
- Cal estudiar els processos de col·locació de les bigues saltadores actuals, per veure com es podria implementar, per que sigui suficientment efectiu, el muntatge del sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat.
- Cal dissenyar les peces d'extradossat del sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat. Tant la seva forma, la seva capacitat mecànica com el seu acoblament amb les bigues saltadores o amb alguna estructura auxiliar.
- Cal dissenyar el sistema de tensat dels tendos de les bigues saltadores amb pretensat extradossat, analitzant quin sistema de tensat és el més efectiu des de diversos punts de vista: disponibilitat dels equipaments, capacitat mecànica, facilitat de transport i de muntatge i cost.
- Cal dissenyar la peça de recolzament central de les bigues saltadores, analitzant quines sol·licitacions ha de suportar i quina resposta mecànica ha de produir en el sistema estructural, de manera que, entre altres coses, la seva rigidesa sigui totalment coneguda i controlada.
- Cal dissenyar una estructura auxiliar que suporti les reaccions horitzontals del sistema de pretensat, evitant que aquests esforços afectin les bigues saltadores.
- Si es planteja un reforç per un pont en corba, també cal estudiar un sistema d'unió entre la peça de recolzament central de les bigues saltadores amb aquesta estructura auxiliar (que absorbeix les reaccions horitzontals del pretensat), de manera que aquesta unió impedeixi moviments laterals de la peça central, sense transmetre-li moments flectors o torsors.
- Cal estudiar, de manera general, segons la normativa que s'apliqui en cada país, la capacitat portant dels estreps dels ponts, sobretot quan aquests es preveuen sol·licitar amb bigues saltadores.

CAPÍTOL 5: CONCLUSIONS

5.1.- CONCLUSIONS

Al llarg dels capítols d'aquest treball s'ha aprofundit, primerament, en les tècniques de reforç provisional de ponts que s'utilitzen en l'actualitat, mostrant-ne els seus camps d'aplicació i les seves limitacions.

Aquestes són tècniques, que tot i que no reforcen l'estructura del pont com a tal, sí que reforcen (amplien) la capacitat del pont a poder fer circular per ell càrregues superiors a les càrregues de disseny, mitjançant l'ús d'estructures auxiliars (apuntaments i bigues saltadores) que suporten tota o una part de la càrrega que passa pel pont.

En particular s'ha analitzat l'eficàcia estructural del sistema d'apuntaments, sempre i quan sigui possible la seva utilització, és a dir, per altura lliure sota el pont de màxim uns 5 m i quan la superfície sota el pont sigui transitable.

També s'ha mostrat la simplicitat del sistema consistent en bigues saltadores convencionals que, amb la seva facilitat i rapidesa de muntatge, ens permeten fàcilment "saltar" ponts de fins uns 25 m de llum en trams rectes, sense afectació a l'estructura del pont.

Posteriorment s'han introduït la primera idea innovadora d'aquest treball, que és la utilització de les bigues saltadores de manera poc convencional, en aquest cas, recolzant-les al mig de la llum del pont.

Això ja permetria ampliar el camp d'aplicació de les bigues saltadores tradicionals, utilitzant un suport a base de cindris o estructura similar sota el pont, (sempre i quan això sigui possible), allà on es recolzen les bigues saltadores.

També s'ha introduït la idea d'utilitzar un pretensat variable, mostrant la seva necessitat per tal de poder utilitzar el sistema de pretensat exterior per contrarestar càrregues excepcionals sense danyar el pont. Posteriorment s'ha vist la conveniència de muntar aquest sistema de pretensat exterior per sobre de l'estructura del pont, evitant d'aquesta manera qualsevol afectació a l'estructura del pont i simplificant molt totes les operacions de muntatge i desmuntatge.

Amb aquests ingredients s'ha arribat a la concepció del sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat mostrant, mitjançant un estudi d'ordres de magnitud, que aquest nou sistema és viable, al menys des d'un punt de vista de teoria estructural. Amb aquest sistema es podrien reforçar ponts de llums de fins uns 50 m aproximadament, depenent una mica dels equipaments dels que disposem.

Finalment s'han anomenat alguns aspectes que caldria seguir estudiant amb més detall per poder desenvolupar el sistema proposat, i en tot cas, fer-ne una evolució fins a un sistema comercialitzable, si aquest en fos l'objectiu final.

5.2.- RECOMANACIONS

1) Guia de presa de decisions

Per tal de poder triar el sistema de reforç provisional més adient per a cada cas es proposa aquesta guia on, de manera sintetitzada, es plantegen diferents escenaris que són alguns dels condicionaments que ens podem trobar davant la necessitat de planejar un transport especial per un pont.

Mitjançant un sistema de puntuació podem, de manera aproximada, valorar cada un dels sistemes proposats, per triar-ne el que obtingui la major puntuació total, és a dir, per triar el sistema de reforç més idoni.

Es valora aquesta idoneïtat segons el següent un criteri de puntuacions, però hi ha la possibilitat de triar qualsevol altre tipus de puntuació si fos necessari homogeïntzar les puntuacions amb altres valoracions:

- 1.- Molt poc idoni o impossible d'utilitzar.
- 2.- Poc idoni o amb moltes complicacions.
- 3.- Possible sense majors complicacions.
- 4.- Adequat.
- 5.- Molt adequat.

La taula 5.1 mostra la idoneïtat de cada sistema de reforç provisional proposat. Es considera que el sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat ("saltadores extradossades") ja està totalment desenvolupat tècnicament i introduït al mercat de manera industrialitzada, cosa que permetria que el seu muntatge fos tant sols una mica més lent que el muntatge de bigues saltadores.

En la taula "superfície transitable" es refereix a casos on podem col·locar algun tipus d'estructura portant sota el pont, per exemple, per que no hi ha cap riu. "Pont ample" es refereix a un pont on el convoi de transport no ocupa tota l'amplada del pont i es permet un cert trànsit de vehicles durant el muntatge del sistema.

Condicionant principal	Altres condicionants	Apuntament	Cindris o similar	Bigues saltadores	Saltadores amb cindris	Saltadores extradossades
Altura lliure sota el pont ≤ 5 m	Superfície transitable	3	2	5	3	5
	Superfície no transitable	1	1	5	2	5
Altura lliure sota el pont > 5 m	Superfície transitable	1	3	5	4	5
	Superfície no transitable	1	1	5	1	5
Altura lliure sota el pont > 5 m	Llum ≤ 25 m	1	1	5	2	5
	Llum 25 – 50 m	1	1	1	3	5
Pont amb canvis de rasant molt considerables	Altura lliure ≤ 5 m	3	3	1	1	1
	Altura lliure > 5 m	1	3	1	1	1
Pont amb inclinació	Superfície transitable	2	3	1	2	1
	Superfície no transitable	1	1	1	2	1
Pont en corba	Llum ≤ 25 m	2	2	1	2	5
	Llum 25 – 50 m	1	2	1	3	5
Temps de muntatge/desmuntatge	Altura lliure ≤ 5 m	2	2	4	3	4
	Altura lliure > 5 m	1	2	4	2	4
Temps de muntatge/desmuntatge	Llum ≤ 25 m	2	2	5	3	5
	Llum 25 – 50 m	1	1	2	4	5
Nivell de tecnologia utilitzada	Tots els casos	5	4	4	3	3
Afectació al trànsit sobre el pont	Pont estret	5	5	2	2	2
	Pont ample	5	5	3	3	3
Afetació al trànsit sota el pont	Si és possible la solució	1	1	5	2	5
Seguretat pels operaris	Altura lliure ≤ 5 m	4	4	5	3	5
	Altura lliure > 5 m	1	2	5	2	5

Taula 5.1.- Idoneïtat dels sistemes de reforç provisional.

2) Esquema d'implantació

En aquest apartat es fa un petit esquema cronològic dels passos a seguir davant un possible muntatge del sistema de bigues saltadores amb pretensat extradossat per realitzar un transport especial:

- Anàlisi del sistema de càrregues que representa el convoi de transport especial. En particular cal saber la distribució i la càrrega de cada eix.
- Anàlisi de la capacitat portant del pont, tant a nivell longitudinal com transversal. Anàlisi a nivell local de les zones de recolzament de les bigues saltadores.
- Anàlisi de la capacitat portant dels estreps del pont.
- Dimensionament del sistema de pretensat de les bigues saltadores. En particular cal conèixer les forces de pretensat que seran necessàries aplicar.
- Determinació de la relació entre els metres que avança el convoi sobre el pont i la força de pretensat que cal aplicar.
- Planejar a llarg termini el transport especial i el muntatge/desmuntatge de les bigues saltadores, d'acord amb la normativa vigent i les autoritats en gestió de transports especials d'allà on es planegi el transport.
- Planejar a curt termini el dia del transport especial, tenint en compte fenòmens meteorològics inadequats pel transport/muntatge i tenint en compte circumstàncies particulars que puguin afectar el trànsit rodat.
- Comprovar el correcte funcionament de tots els equipaments que conformen el sistema de reforç i preveure possibles reparacions i recànvis que caldria tenir a mà en cas de produir-se algun imprevist durant el transport especial.
- Pel muntatge i desmuntatge de les bigues saltadores amb pretensat extradossat se seguirien els següents passos:

0.- Tall de trànsit pel pont a travessar.

1.- Numerar sobre el pont marques cada metre començant per el costat on el convoi iniciarà el pas pel pont.

Per l'altre extrem continuar fent marques numerades cada metre fins la distancia que recorrerem quan el convoi acabi del tot el su pas pel pont. Per exemple, si el pont té 20 m i el convoi és de 15 m, marcariem 35 m, començant per l'extrem per on entra el vehicle sobre el pont.

- 2.- Situar la peça de recolzament central de les bigues saltadores just al mig de la llum del pont i en la zona prèviament estudiada en relació a la secció transversal del pont, que generalment serà el centre del pont.
 - 3.- Col·locar les peces de recolzament sobre la zona dels estreps del pont i les rampes d'accès a les bigues.
 - 4.- Col·locar el sistema de bigues saltadores.
 - 5.- Instal·lar les parts components del sistema de pretensat: els tendons, els gats, les estructures auxiliars necessàries i els sensors de càrrega.
 - 6.- Provar el sistema de pretensat prèviament al pas del convoi.
 - 7.- Tenir disponible el gràfic que relaciona m/força de pretensat.
 - 8.- Realitzar el transport a velocitat molt reduïda i perfectament controlada.
 - 9.- Retirada del sistema de pretensat.
 - 10.- Retirada de les bigues saltadores.
 - 11.- Retirada de les peces de recolzament i de les rampes d'accès.
 - 12.- Restabliment del trànsit.
- Posteriorment es controlaria minuciosament l'estat de tot l'equipament utilitzat, i en especial, l'estat dels tendons de pretensat.

CAPÍTOL 6: BIBLIOGRAFIA

IAP-11

Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera

(Font: https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/0820303.pdf)

Servei Català de Trànsit

Autoritzacions especials de circulació per a vehicles en règim de transport especial o vehicles especials

(Font: http://transit.gencat.cat/ca/gestions/autoritzacions_especials_te_ve/index.html)

Reglamento General de Vehiculos

BOE-A-1999-1826 - Especialment l'annex IX (masses i dimensions)

(Font: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1998/12/23/2822/con#anix>)

DGT- Reglamento sobre vehiculos pesados, especiales, etc.

(Font: <http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/formacion-vial/cursos-para-profesores-y-directores-de-autoescuelas/XVIII-Curso-de-Profesores/Reglamentacion-vehiculos-pesados.pdf>)

Análisis y Dimensionamiento de Puentes de Dovelas Prefabricadas con Pretensado

Exterior - TFG en ingeniería Civil. Autor Jiménez Manfredi, Javier, Universitat de Sevilla

(Font: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/27152>)

Series Normativas, Ministerio de Fomento

Pretensado exterior en puentes de carretera

(Font: http://www.carreteros.org/normativa/estructuras/otras/pdfs/p_exterior2.pdf)

Article

Puente extradadosado sobre el río Deba

(Font: <http://e-ache.com/modules/ache/ficheros/Realizaciones/Obra49.pdf>)

Document: Origen e historia de los puentes extradadosados

Jornada técnica anual de ACHE. Torroja Ingenieria SL

(Font: <http://torrojaingenieria.es/Publicaciones/634-ACHE%202015%20Puentes%20extradosados.pdf>)

Revista: Acero y hormigon num 231 (any 2004)

De la Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural (ACHE)

(Font: <http://e-ache.com/modules/hormigonyacero/pdf.php?id=231>)

Guía práctica de refuerzos de sistemas estructurales

Master de edificación: trabajo final de máster

(Font: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/78360/memoria.pdf>)

Puntals: Jornada divulgativa: Seguridad en fase de estructuras

Organitzada per ACHE

(Font: <http://aceweb.cat/web2015/wp-content/uploads/big-docs/ponencias-jornada-cimbras-marzo-2018/3-NORMAS.pdf>)

Prontuario estrctures senzilles

(Font: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/78360/memoria.pdf>)

Software de càlcul estructural

TwoDFrame

(Font: <https://civilgeeks.com/2012/03/07/programa-gratis-para-analisis-estructural-twodframe/>)

Llibre

Hormigón armado y pretensado I y II. Edicions UPC

Juan Murcia Vela, Antonio Aguado de Cea, Antonia R. Marí Bernat

ANNEXOS

ANNEX 1.- Relació entre el pas del vehicle pesat i la força de pretensat variable

Com s'ha comentat en diferents punts d'aquest treball es preveu que el pas d'un vehicle pesat per sobre bigues saltadores recozades al centre de la llum d'un pont crei unes accions verticals variables sobre el taulell del pont a mesura que el vehicle circula per sobre el pont.

En aquest annex resoldrem un cas concret per mostrar com podem obtenir una relació entre els metres que avança el vehicle sobre el pont i la força vertical que ha de proporcionar-nos el pretensat.

El procediment que farem és el que ja s'indicava breument el la figura 3.9 d'aquest treball, però ara amb un anàlisi estructural més detallat. Consisteix en anar calculant, pas per pas, les reaccions (accions que arriben al pont via el recolzament de les bigues saltadores) en el centre de la llum del pont, a mesura que el vehicle (càrrega) avança per pont.

Això és una anàlisi estructural relativament molt senzilla de fer però cal estar molt atents a com fem treballar l'estructura per que el seu funcionament teòric sigui el que tindria en un cas real.

En particular cal parar molta atenció en fer treballar les bigues saltadores com a bigues birecolzades i no com a biga contínua amb un recolzament intermig.

En la figura "annex 1.1" es mostren aquests diferents sistemes estructurals.

En (a) es mostra un sistema erroni en aquest context, de biga contínua, i en (b) es mostra el sistema de bigues saltadores birecolzades, que utilitzarem en la anàlisi.

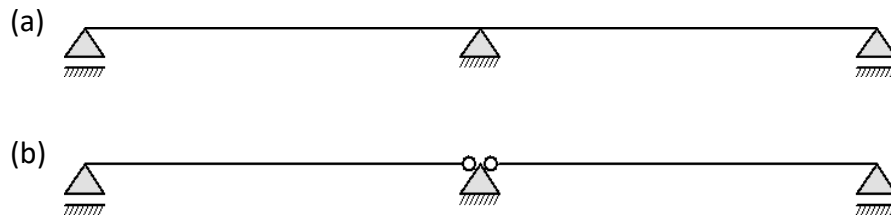


Figura annex 1.1.- Esquemes estructurals de bigues saltadores

En la figura “annex 1.2” es pot comprovar com la opció (a) no correspon amb el sistema estructural que plantegem de bigues saltadores birecolzades, estudiant en aquest cas les reaccions en el suport central. En (b) es comprova que l’estructura efectivament respon com s’espera.

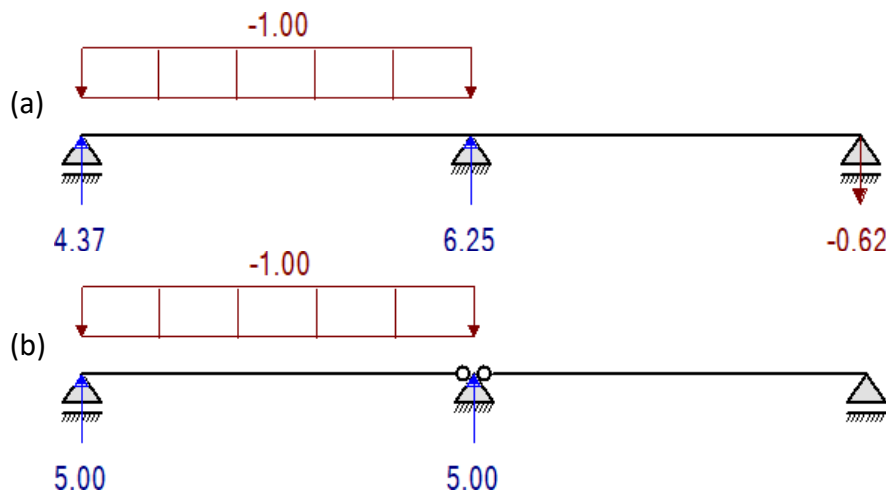


Figura annex 1.2.-Reaccions amb diferents esquemes estructurals.

Un cop hem assegurat que el nostre esquema estructural respon com s’espera, en aquest cas segons el model (b), procedim a estudiar com evolucionen les reaccions en el centre de la llum del pont, és a dir, en el recolzament central del sistema estructural aquí plantejat.

Per mostrar aquest procés, que serà diferent per cada cas que estudiem, podem prendre un exemple concret amb els següents valors:

- Longitud total del pont: 20 m
- Sistema longitudinal amb dues bigues saltadores de 10 m
- Longitud de la càrrega: 15 m
- Pes de la càrrega unitari: 1 kN/m

Cal observar que prenent una càrrega unitària ja tindrem la informació necessària per poder calcular la força de pretensat vertical que cal aplicar, simplement

multiplicant pel valor en [KN/m] de la nostra càrrega real. Posteriorment calcularem la força que hem de proporcionar amb cada tendó de pretensat.

El la figura “annex 1.3” es mostren alguns passos (cada 2 m) de la seqüència de pas de la càrrega, i s’observa l’evolució del valor de les reaccions.

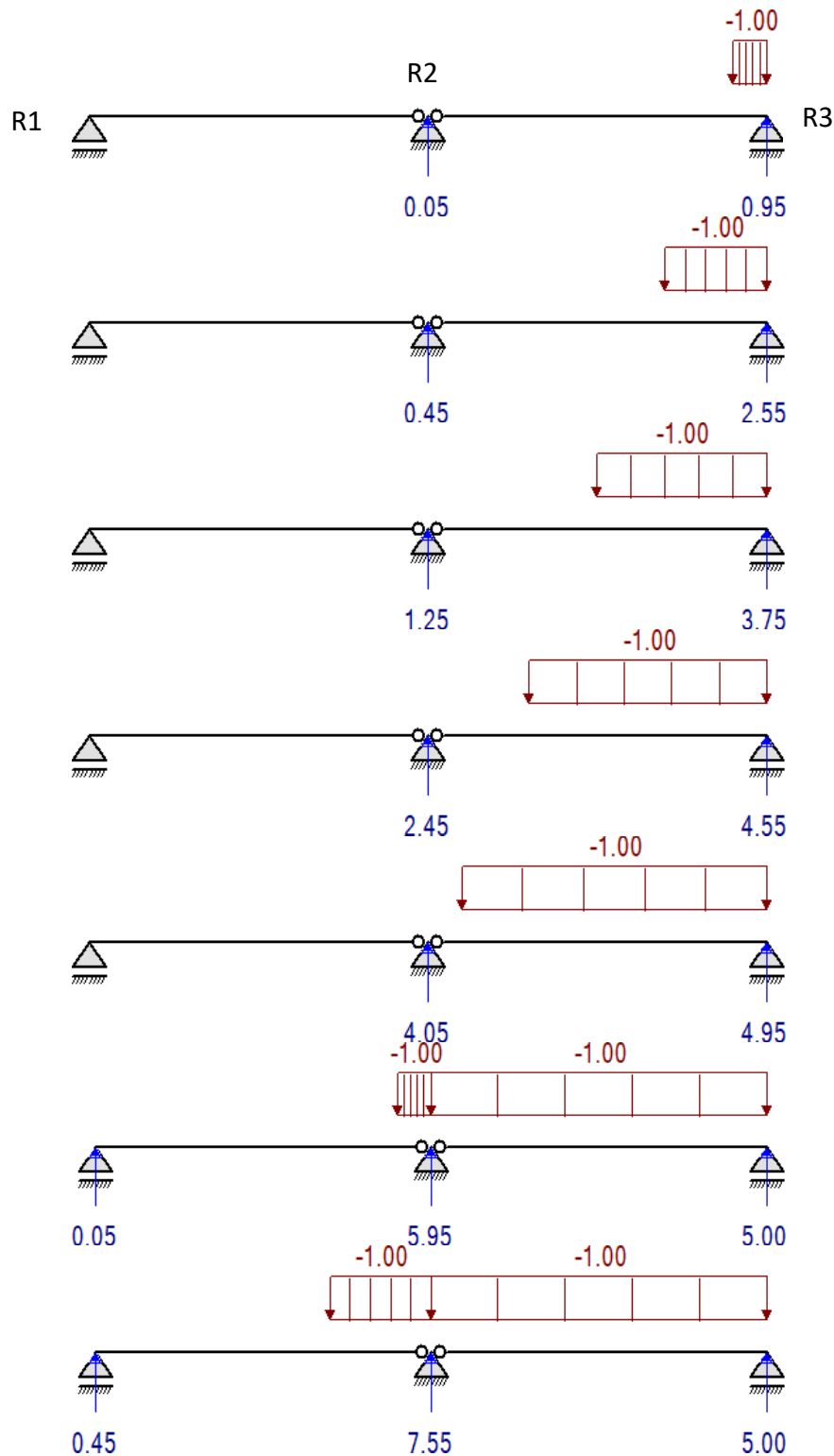


Figura annex 1.3.- Reaccions durant la seqüència de pas

Un cop fem passar tota la càrrega, en aquest cas concret, de longitud 15 m, i anotant els valors de les reaccions per cada metre que avança la càrrega, obtindriem un taula de resultats.

En la “taula annex 1.1” es mostren els valors resultants de les reaccions sobre els recolzaments de les bigues saltadores. El valor de R2, el que més ens interessa estudiar, és del recolzament sobre el centre de la llum del pont.

Metres	R1	R2	R3
1	0,00	0,05	0,95
2	0,00	0,20	1,80
3	0,00	0,45	2,55
4	0,00	0,80	3,20
5	0,00	1,25	3,75
6	0,00	1,80	4,20
7	0,00	2,45	4,55
8	0,00	3,20	4,80
9	0,00	4,05	4,95
10	0,00	5,00	5,00
11	0,05	5,95	5,00
12	0,20	6,80	5,00
13	0,45	7,55	5,00
14	0,80	8,20	5,00
15	1,25	8,75	5,00
16	1,80	9,15	4,05
17	2,45	9,35	3,20
18	3,20	9,35	2,45
19	4,05	9,15	1,80
20	5,00	8,75	1,25
21	5,00	8,20	0,80
22	5,00	7,55	0,45
23	5,00	6,80	0,20
24	5,00	5,95	0,05
25	5,00	5,00	0,00
26	4,95	4,05	0,00
27	4,80	3,20	0,00
28	4,55	2,45	0,00
29	4,20	1,80	0,00
30	3,75	1,25	0,00
31	3,20	0,80	0,00
32	2,55	0,45	0,00
33	1,80	0,20	0,00
34	0,95	0,05	0,00

Taula annex 1.1.- Reaccions en els recolzaments de les bigues saltadores

Cal tenir present que els “Metres” marcats en la taula anterior es refereixen als metres que avança en convoi des de l’inici del pas pel pont, per això, tot i que el pont tingui una llum de 20 m, la part trasera del convoi estarà circulant sobre el pont durant un total de 35 metres: 20 m del pont + 15 m del convoi.

En la figura “annex 1.4” es presenten aquests resultats de manera gràfica, per que és una manera molt intuïtiva d’entendre com evolucionen aquestes reaccions. Es mostren els valors del recolzament central (R2).

Força vertical [kN]

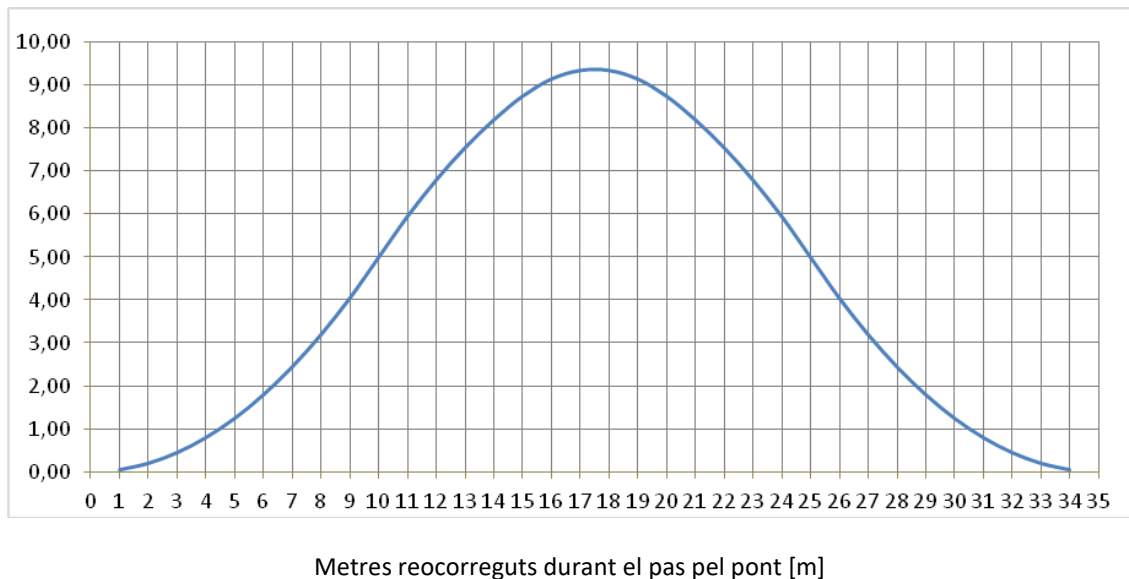


Figura annex 1.4.- Evolució de la reacció en R2 per càrrega repartida unitària durant el pas del convoi sobre el pont. (Font: elaboració pròpia)

A partir d’aquests valors determinariem la força que hem de proporcionar amb cada tendó de pretensat, a banda i banda del sistema de bigues saltadores, seguint els passos següents (que es troben també detallats en l’apartat 4.3):

- Multipliquem les càrregues unitàries per la càrrega repartida real, obtenint un gràfic amb la força vertical que sollicita el pont durant el pas del convoi.
- Analitzem la capacitat portant del pont.
- Comparant les forces o comparant els moments flectors produïts, deduïm la part de la sollicitació deguda al pas del vehicle pesat que no és suportada pel pont.

Aquesta força l’haurà de proporcionar el nostre sistema de pretensat. Aquí podríem ajustar la força del pretensat dins uns marges inferior i superior, depenent de quina sollicitació admetem que suporti el pont.

- Dividim els valors obtinguts per dos, ja que hi ha un sistema de pretensat a cada banda del pont vist longitudinalment.
- Calculem la força que ha de proporcionar cada tendó de pretensat amb l'expressió deduïda de l'esquema de forces triangular del pretensat:

$$P_{\text{vertical tendó}} = 2 \cdot P_{\text{tendó}} \cdot \sin \alpha$$

$P_{\text{tendó}}$ = força que hem de proporcionar amb cada tendó [KN]

$P_{\text{vertical tendó}}$ = component vertical de la força de cada tendó [KN], són els valors trobats a partir dels passos anteriors.

α = angle d'inclinació del traçat de pretensat

Amb aquestes dades ja podríem dissenyar el nostre sistema de pretensat acoblat a les bigues saltadores. En aquest dimensionament hauríem de triar certes dimensions, com l'àrea del pretensat o la capacitat del gat hidràulic (màxima elongació permesa).

Del dimensionament final obtindriem el valor de la força de pretensat de cada tendó, així com l'allargament aproximat esperat pels tendos.

